

Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

51.2
H62
В. З. НИКИТСКИЙ



МАЛОМОЩНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ



Выпуск 267

В. З. НИКИТСКИЙ

МАЛОМОЩНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

231969/4

Проверено 19 86 г.

Абонемент

Удостоверение
Владелец: А. Н. Лосев
Безвозмездного пользования



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1968

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Долгов А. Н., Ежков В. В., Камниский Е. А.,
Мандрыкин С. А., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

Никитский В. З.

Н 62 Малоомощные силовые трансформаторы. М.,
«Энергия», 1968. Выпуск 267.
88 с. с илл.

Некоторые предприятия энергетического профиля, которым приходится изготавливать мелкие трансформаторы, часто используют радиолюбительские руководства. Однако технические требования к трансформаторам, используемым в энергетических предприятиях, в ряде случаев могут значительно отличаться от требований к трансформаторам радиоприемной аппаратуры.

В настоящей брошюре изложены требования к малым трансформаторам, используемым в релейной защите, автоматике, испытательных устройствах и др., их расчет, технология изготовления и ремонта в условиях несерийного производства на предприятиях энергетических систем.

Брошюра предназначена для квалифицированных электромонтеров и мастеров, занятых эксплуатацией и ремонтом электрооборудования.

Отзывы и пожелания по данной брошюре направляйте по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия», «Библиотека электромонтера».

3-3-10

126-68

6П2

Никитский Владимир Зиновьевич
Малоомощные силовые трансформаторы

Редактор *А. А. Воскресенский*
Технический редактор *Л. И. Гаврилина*
Корректор *Н. В. Лобанова*

Сдано в набор 2/IV 1968г.

Формат 84×108¹/₃₂

Усл. печ. л. 4,62

Тираж 20 000 экз.

Подписано к печати 18/VI 1968 г.

Бумага типографская № 2

Уч.-изд. л. 4,93

Цена 17 коп.

Зак. 1197

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЗНАЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Принцип действия и выводы основных расчетных выражений. Трансформатор, как известно, предназначен для преобразования переменного напряжения в другое, большей или меньшей величины. Состоит он из стального сердечника (магнитопровода) и двух обмоток, из которых одна (первичная) включается на напряжение питающей сети, а с другой (вторичной) снимается на нагрузку напряжение требуемой величины (рис. 1). В ряде случаев вторичных обмоток может быть несколько¹.

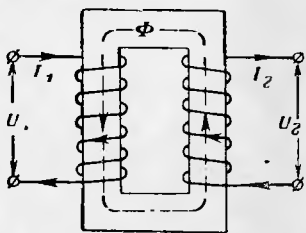


Рис. 1. Принципиальная схема трансформатора.

При подаче переменного напряжения на первичную обмотку по обмотке проходит ток намагничивания, под действием которого в стали магнитопровода возникает магнитный лоток. В обмотках магнитный поток наводит электродвижущую силу (э. д. с.)

$$E = 4,44 f \omega S_c B \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где E — действующее значение напряжения (э. д. с.);

ω — число витков обмотки;

S_c — сечение магнитопровода, см^2 ;

B — максимальное значение индукции, тл (1 тл = 10^{-4} зс);

f — частота сети.

¹ В схемах автоматики часто приходится применять так называемые «разделительные» трансформаторы с коэффициентом трансформации $1/1$ для электрической изоляции одних цепей от других.

Произведение индукции на сечение стали даст значение магнитного потока $\Phi = BS_c$.

Решение выражения (1) относительно ωS_c с заменой частоты его значением 50 гц дает:

$$\omega S_c = \frac{10^2 E}{2,22 B} = \frac{45 E}{B}. \quad (2)$$

Разделив обе части равенства на напряжение E и учтя, что $\frac{\omega}{E}$ определяет число витков, соответствующих напряжению 1 в, получаем:

$$S_c \frac{\omega}{v} = \frac{45}{B} \quad (3)$$

или

$$\frac{\omega}{v} = \frac{45}{BS_c}.$$

Если вторичное напряжение меньше (или больше) первичного, то соответственно повышается (или понижается) ток, но произведения напряжения каждой стороны на свой ток должны быть равны. Но при трансформации (как и при любой передаче энергии) неизбежны потери. Потери будут в меди обмотки ($I^2 R$) и в стали на создание переменного магнитного потока. Поэтому мощность, отдаваемая трансформатором, всегда будет меньше мощности, потребляемой от сети. Отношение вторичной мощности к первичной именуется коэффициентом полезного действия (к. п. д.). Если трансформатор не нагружен, то во вторичной обмотке потери отсутствуют и вторичное напряжение $U_2 = E$ (э. д. с.). Напряжение

$$U_1 > E > U_2 k_T,$$

где k_T — коэффициент трансформации по числу витков.

Сечение стали магнитопровода и число его витков определяют величину напряжения. Мощность трансформатора определяется произведением напряжения на ток. Трансформаторы малой мощности рассчитываются обычно по активной нагрузке. В окне магнитопровода должны поместиться первичная и вторичная обмотки. Мощность вторичной обмотки меньше первичной из учета к. п. д. (η_T) трансформатора. Суммарная мощность составит:

$$P_1 (1 + \eta_T) = U_1 I_1 (1 + \eta_T).$$

Мы можем приравнять U_1 к E в выражении (2), так как число витков первичной обмотки снижают на падение напряжения в первичной обмотке, а во вторичной обмотке число витков на тот же процент повышают (это обосновано далее при расчетах обмоток). Поэтому среднее значение э. д. с. обоих обмоток равно U_1 .

Умножив выражение (2) на $I(1 + \eta_T)$, получим справа мощность двух обмоток. Разделив полученное на плотность тока Δ (а/мм²), получим в левой части сечение меди обмотки S_M .

Обозначим отношение сечения меди обмотки к размеру окна коэффициентом $k_M = \frac{S_M}{10^2 S_o}$. В знаменатель введен множитель 10^2 , так как сечение меди выражается в квадратных миллиметрах, а размер окна — в квадратных сантиметрах.

Разделив полученное выражение на k_M , получаем:

$$S_o S_c = \frac{P_1 (1 + \eta_T)}{2,22 k_M \Delta B}. \quad (4)$$

Поскольку обычно замеряют геометрические размеры магнитопровода, то надо учитывать неплотное прилегание пластин, окалину, лаковое покрытие. Можно коэффициент заполнения стали $k_{ст}$ принять равным 0,9, что близко к действительным значениям. Приняв геометрические размеры за сечение стали, получим:

$$S_o S_c = \frac{P (1 + \eta_T)}{2 k_M \Delta B}. \quad (5)$$

Потери в трансформаторе. Величина тока намагничивания и потерь в стали зависит от индукции в стали. При малых изменениях индукции в небольшом перепаде имеется некоторая пропорциональность индукции и тока намагничивания. С увеличением индукции ток намагничивания возрастает более интенсивно, и с определенного значения индукции величина тока намагничивания начинает резко увеличиваться. Это значение индукции называется индукцией насыщения.

Значения индукции насыщения, потерь в стали и тока намагничивания для различных сталей могут отличаться в очень большой степени, определяемой составом стали и ее термической обработкой. Эти величины являются основными параметрами стали (марок стали).

Выбор той или иной марки стали определяет параметры магнитопровода и трансформатора.

Полная мощность намагничивания стали магнитопровода определяется произведением тока намагничивания на э. д. с. Ток намагничивания пропорционален длине магнитной линии; э. д. с. пропорциональна сечению стали; их произведение определяет объем стали (удельный вес стали может быть заменен весом стали). Ток намагничивания отстает от э. д. с. на значительный угол. Для обычных электротехнических сталей этот угол в зависимости от индукции, марки стали и выполнения магнитопровода может изменяться в очень широких пределах, не превышая (в рабочем пределе индукции) 60—80°. В ряде случаев более существенна активная составляющая тока намагничивания, создающая активные потери, нагрев магнитопровода и определяющая к. п. д. трансформатора. Заводы-изготовители указывают для изготавливаемых марок стали зависимость индукции от напряженности магнитного поля ($ав/см$) удельных ампер-витков и активные потери в стали в ваттах на килограмм веса стали при некоторых рабочих значениях индукции.

Из выражения (4) следует, что при неизменных параметрах правой части равенства для получения требуемой мощности трансформатора можно взять любое соотношение между размером окна и сечением магнитопровода. При увеличении сечения стали магнитопровода увеличиваются вес и потери в стали, и с уменьшением числа витков снижаются потери в меди. При увеличении окна магнитопровода увеличиваются потери в меди и снижаются потери в стали. Наименьшие потери будут при равенстве потерь в меди и стали.

Следует оценить, какие отклонения допустимы без значительного ухода от оптимального значения. При к. п. д. трансформатора, равном 0,9, потери в меди и стали составят $5\% + 5\% = 10\%$. При снижении одного компонента в 1,5 раза и таком же увеличении второго компонента потери составят $3,3\% + 7,5\% = 10,8\%$. Даже при изменении потерь в 2 раза, когда отношение одного компонента к другому составит 1 : 4, общие потери увеличатся до 12,5% против 10%. При дальнейшем увеличении этого отношения общие потери заметно возрастают.

То обстоятельство, что для выполнения тех или иных требований к трансформатору в ряде случаев можно в широких пределах оперировать с параметрами маг-

нитопровода и трансформатора, дает возможность широкого использования однотипных пластин стали. Выше при рассмотрении выражения (4) принималось, что параметры правой части равенства остаются неизменными. Однако при изменении их (например, индукции, плотности тока) оптимальные условия смещаются в ту или другую сторону.

Специфичные требования к трансформатору в зависимости от его назначения. Наиболее распространенные трансформаторы (из бытовых) — трансформаторы в радиоприемниках и телевизорах — отличаются тем, что они работают всегда с нагрузкой, близкой к номинальной. Поэтому в конечном результате безразлично, какие потери будут преобладать: потери в меди или в стали. Можно значительно увеличить объем стали и поднять индукцию (не выходя за пределы допустимых потерь). При этом уменьшается объем меди и упрощается технология изготовления обмотки. В основном в таком направлении производится расчет и изготовление этих трансформаторов. В большой степени этому способствует применение современных сталей с малыми потерями. Аналогичны условия работы трансформаторов и требования к ним в различных лабораторных электронных устройствах и приборах. При этом часто основное требование к этим трансформаторам — снижение их размеров, так как в ряде случаев это позволяет снизить размеры и вес всего устройства, что особенно существенно для устройств, предназначенных для выездных работ. Применением марок проводов, допускающих более высокий нагрев и, следовательно, более высокую плотность тока, также можно снизить размеры и вес трансформатора. Для лабораторных приборов обычно к. п. д. значения не имеет.

Для бытовой радиоприемной аппаратуры к. п. д. силового трансформатора также не имеет существенного значения. Безусловно, если учитывать массовость этой аппаратуры, вопросы снижения потребления радиоприемных устройств имеют большое значение, но также существенны и размеры. Более эффективное снижение потребления идет по пути разработки и внедрения экономичных малогабаритных ламп с малыми токами накала и с большой крутизной характеристик, разрабатываются и внедряются полупроводники и малогабаритные детали повышенного качества.

Однако в ряде случаев условия работы трансформатора и требования к нему могут значительно отличаться. Трансформатор может работать в режиме переменной нагрузки, в некоторых случаях длительно оставаться без нагрузки. В различных схемах автоматики, релейной защиты и в других областях техники такой режим работы встречается часто. Величина тока намагничивания часто является решающим фактором, как, например, в измерительной технике (теплизмерениях), промежуточных трансформаторах напряжения и тока, в релейной защите и в ряде других устройств.

Встречаются аналогичные требования и в бытовых трансформаторах. Например, если бытовой автотрансформатор включен на холодильник, где двигатель работает не более 15—20% всего времени, а остальное время электроэнергия продолжает расходоваться на потери в стали, то очевидно, что при расчете надо стремиться снизить до минимума потери в стали, допуская повышенные потери в меди.

Бывает и ряд других дополнительных требований.

Подходить к расчету трансформаторов с одним «универсальным» методом расчета, предлагаемым руководствами специально для радиоприемной аппаратуры, как это подчас имеет место, часто недопустимо.

Вопросы надежности. В зависимости от области применения требования надежности трансформаторов и другой аппаратуры различны. Добиваться максимально возможной надежности во всех случаях нецелесообразно, так как при этом значительно повышается стоимость изделий. Возникает понятие «стоимости» надежности. В ряде случаев значительно экономичнее повысить ремонтпригодность и ввести гарантийный ремонт. Иногда повышение надежности приводит к увеличению размеров и веса, ограничивая возможности применения различных испытательных устройств в разьездной работе.

Иное положение с трансформаторами и аппаратурой, предназначенными для ответственных устройств, как, например, в железнодорожной автоблокировке, авиации, в автоматике энергосистем и других областях техники, где выход из строя одного из элементов этих устройств может явиться причиной большого простоя оборудования и привести к аварии.

В основном аппаратура для таких устройств изготавливается на специализированных заводах.

Остановимся на аппаратуре, применяемой в энергосистемах для целей автоматики (телеизмерений, сигнализации и управления) и в релейной защите. Подавляющее большинство аппаратуры — заводского изготовления, но часто приходится выполнять ее ремонт и переделку под требуемые параметры в условиях эксплуатации.

Кроме того, в крупных энергосистемах систематически проводятся для ответственных объектов новые разработки силами лабораторий энергосистем. Производственные возможности и применяемая технология в мастерских в разных энергосистемах различна, но и в лучшем случае уступает заводским условиям.

Специфика требований к трансформаторам, изготавливаемым этими мастерскими, очень широка: по мощности — от трансформатора с сечением стали менее 1 см^2 (в схемах телеизмерений) до трансформаторов с выходной мощностью до $1\text{—}2 \text{ ква}$, так называемых «нагрузочных» (для испытания аппаратуры при больших токах); по климатическим условиям — охватываются все области Союза; по требованиям надежности — для одних трансформаторов это требование является первоочередным, для других существенного значения не имеет.

При установке трансформаторов в сырых помещениях (котельные, насосные), особенно при наличии активных газов, предъявляются требования более тщательно выбора изоляции и применения влагозащитных пропиток и покрытий для снижения влияния токов утечки на изоляцию. В машинных помещениях необходимо учитывать вибрацию. В испытательных устройствах, предназначенных для разъездной работы, необходимо учитывать при минимальном весе механическую прочность. Трансформатор в испытательных устройствах обычно является наиболее тяжелым узлом, его крепление должно быть достаточно продумано.

В настоящей брошюре представляется возможным остановиться на наиболее характерных и общих требованиях к трансформаторам, по второстепенным и редко встречающимся требованиям возможно дать лишь краткие рекомендации.

Оценка необходимой надежности аппаратуры, а также разработка мероприятий для повышения технической

го уровня изделий являются задачей служб надежности, созданных в последнее время на некоторых предприятиях и в научно-исследовательских институтах.

Существующая в энергосистемах аварийная разгрузка по частоте базируется на оценке требуемого уровня надежности энергопитания тех или иных потребителей и лишь косвенно определяет уровень надежности аппаратуры и отдельных элементов этой разгрузки. Поэтому представляет интерес оценка уровня надежности по элементам, рекомендованная для электронной аппаратуры фирмой RCA, [Л. 12], согласно которой уровень надежности элементов определяется по числу отказов за 1 000 ч работы в процентах к числу элементов (табл. 1). Показательно, что фирма к высшему уровню относит электронные вычислительные машины, что естественно,

Таблица 1

Уровень надежности	Условное обозначение	Опасность отказов, % на 1 000 ч	Примечание
Рыночный уровень	<i>O</i>	20	Элементы данного уровня применяются для изделий общего пользования, не требующих количественной оценки надежности
Низкий уровень	<i>R</i>	1,5	Элементы данного уровня применяются для изделий неответственного назначения, которые должны иметь количественную оценку надежности
Стандартный военный уровень	<i>S</i>	0,5	—
Разгруженный стандартный уровень	<i>DS</i>	0,15	К этому уровню относятся элементы уровня <i>S</i> , повышение надежности которых достигнуто за счет их использования в режимах ниже номинальных
Верхний уровень	<i>T</i>	0,05	—
Разгруженный верхний уровень	<i>DT</i>	0,01	Повышение надежности элементов <i>T</i> достигается за счет их использования в разгруженных режимах работы
Высший уровень	<i>U</i>	0,005	—

поскольку они включают десятки тысяч (до сотни тысяч) отдельных элементов. Безусловно, для получения столь высокой надежности требуется очень тщательный отбор деталей и элементов. О необходимости тщательной отбраковки и отбора деталей говорит В. А. Куликов [Л. 8], который отмечает, что «иногда из всего брака, приходящегося на сборочный процесс электронной аппаратуры, 75% отказов происходит из-за покупных комплектующих элементов», последнее, безусловно, определяется низким рыночным уровнем надежности деталей.

2. МАГНИТОПРОВОДЫ

Марки сталей. Магнитопроводы трансформаторов низкой частоты (50 *гц*) выполняются обычно из листовой электротехнической стали, содержащей от 0,5 до 5% кремния (Si), до 1% углерода (C), остальное железо (F). Ввиду того, что их потери с повышением частоты значительно возрастают, они обычно применяются в пределах не выше звуковых частот.

Марки электротехнических сталей, выпускаемых согласно ГОСТ 802-58, обозначаются буквой Э, что означает электросталь. Первая цифра указывает на средний процент содержания кремния, вторая характеризует электромагнитные свойства: цифра 1 — потери обычные, 2 — пониженные, 3 — совсем малые, 4 — нормальные при 400 *гц*. Вторые цифры 5 и 6 говорят о повышенной магнитной проницаемости в слабых полях (менее 0,01 *ав/см*), 7 и 8 — в средних полях (0,1—10 *ав/см*). Третья цифра 0 указывает, что сталь холоднокатаная текстурованная. Третья и четвертая — 00 — обозначают сталь холоднокатаную малотекстурованную. Буква А после цифр обозначает особо низкие удельные потери. Для стали повышенной точности проката и отделки поверхности в конце вводится буква П.

Холоднокатаные стали Э310—Э380, помимо кремния (3—3,25%) и углерода (0,0003%), содержат серу (0,003%), марганец и фосфор (менее 0,1%). Эти стали отличаются от других тем, что имеют высокую проницаемость вдоль проката и пониженную поперек проката.

Одним из основных параметров стали являются потери в стали, состоящие из потерь на гистерезис, на вихревые токи и на последствие. Потери на гистерезис — это работа, затрачиваемая на перемагничивание стали. Обычно принимают, что потери на гистерезис не зависят

от толщины листа, но при прокате листа 0,2 мм и тоньше сталь уплотняется (так как доводка до требуемых величин и для горячекатаных сталей производится на холодных листах) и потери на гистерезис увеличиваются. Потери на гистерезис на один цикл перемагничивания (при постоянной индукции) в пределах 10—20-кратного изменения частоты (50—1 000 *гц*) практически можно считать постоянными. Следовательно, при отнесении к единице времени (1 *сек*) они увеличиваются пропорционально увеличению частоты.

Вихревыми токами называются токи, появляющиеся в стали под действием э. д. с., наводимой магнитным потоком (в плоскостях, перпендикулярных направлению потока). Эти токи приводят к потерям. С уменьшением толщины пластины уменьшается э. д. с. пластины и увеличивается омическое сопротивление стали. Общие потери в стали магнитопровода на вихревые токи снижаются примерно пропорционально уменьшению толщины пластины. Но токи могут замыкаться и в толще магнитопровода через контактирующие поверхности пластин, поэтому между пластинами должна быть изоляция, особенно при увеличении ширины пластин и повышении индукции. Помимо толщины листов, на величину вихревых токов и потерь влияет омическое сопротивление стали (не смешивать с магнитным сопротивлением). Омическое сопротивление стали (как и провода) в омах соответствует сопротивлению 1 м длины при сечении 1 мм². С увеличением процентного содержания кремния увеличивается омическое сопротивление стали. Потери увеличиваются пропорционально квадрату повышения частоты.

Потери на последствие вызываются магнитной вязкостью материала и зависят от обработки ферромагнитных материалов. Определяются они по разности между общими потерями и потерями на гистерезис и на вихревые токи. С увеличением частоты эти потери пропорционально увеличиваются. Полные активные потери электротехнических сталей при изменениях индукции (в пределах рабочих значений) изменяются пропорционально квадрату индукции, при индукциях ниже 0,5—0,7 тл они несколько завышаются против этого соотношения.

Полные активные потери в стали и реактивная составляющая определяют величину тока намагничивания. В табл. 2 приведены активные потери при частоте 50 *гц* для основных электротехнических сталей.

В изделиях ширпотреба применяются листы сталей толщиной 1,0; 0,5; 0,35 мм различных марок. В бытовой радиоприемной аппаратуре для силовых трансформаторов, дросселей, трансформаторов кадров (в телевизорах) применяют в основном марки сталей Э41, Э42 (реже

Таблица 2

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, <i>вт/кг</i> , при <i>B</i> , тл			Индукция <i>B</i> , тл, при 300 <i>ав/см</i>
		1,0	1,5	1,7	
Э11—Э12	1,0	5,8—5,5	13,4—12,5	—	2,0—1,98
Э11—Э13	0,5	3,3—2,8	7,7—6,5	—	2,0—1,98
Э21—Э22	0,5	2,5—2,2	6,1—5,3	—	1,95
Э31—Э32	0,5	2,0—1,8	4,4—3,9	—	1,94—1,92
Э31—Э32	0,35	1,6—1,4	3,6—3,2	—	1,92
Э41—Э42	0,5	1,55—1,4	3,5—3,1	—	1,90—1,89
Э43—Э43А	0,5	1,25—1,15	2,9—2,7	—	1,89
Э41—Э42	0,35	1,35—1,2	3,0—2,8	—	1,90—1,89
Э43—Э43А	0,35	1,05—0,9	2,5—2,2	—	1,89
Э310—Э320	0,5	1,1—0,95	2,45—2,1	3,2—2,8	1,98—2,0
Э330	0,5	0,8	1,75	2,5	2,0
Э310—Э320	0,35	0,8—0,7	1,75—1,5	2,5—2,2	1,98—2,0
Э330—Э330А	0,35	0,6—0,5	1,3—1,1	1,9—1,6	2,0

Примечание. Сдвоенные данные соответствуют: левые — левым маркам, правые — правым маркам.

Э43), Э310, Э320 толщиной 0,35 мм (редко 0,5 мм). В трансформаторах, применяемых в технике для различных устройств и работающих в основном при постоянном значении питающего напряжения, целесообразно применять указанные выше марки и дополнительно Э43, Э43А, Э330, Э330А. Применять следует стали толщиной 0,35 мм. В устройствах автоматики, телеизмерений с применением частоты 200, 400, 1000 *гц* следует применять марки Э44, Э340, рекомендуется толщиной 0,2 мм. Эти стали применяют также в трансформаторах усилителей звуковых частот. При изготовлении трансформаторов для указанных частот все расчеты, начиная с выражения (2), выполняются с учетом соответствующей частоты. В табл. 3 указаны для этих марок потери при частоте 400 *гц*.

Помимо этих марок, имеются марки Э1100—Э3200, близкие по своим параметрам к маркам Э11—Э32. Для трансформаторов малой мощности они не применяются.

Таблица 3

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, вт/кг при B , тл		Удельное электросопротивление, $\text{ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$
		0,75	1,0	
Э44	0,35	10,7	19	0,57
Э44	0,20	7,2	12,5	0,57
Э44	0,10	6	10,5	0,57
Э340	0,20	7	12	0,47

Поскольку в литературе встречаются старые наименования сталей, то в табл. 4 приведено соотношение этих обозначений с ГОСТ.

Потери в стыках магнитопровода. Как сказано выше, характеристики намагничивания принято строить по напряженности магнитного поля (ав/см). Но при этом магнитное сопротивление стали магнитопровода (и сечение) должно быть одинаковым по всей длине средней магнитной линии магнитопровода.

Магнитопроводом, удовлетворяющим этим требованиям, является кольцевой магнитопровод, так называемый торроид. Небольшие торроиды широко применяются в схемах автоматики, где они выполняются либо наборными из штампованных колец листовой стали, либо витыми из ленты соответствующей марки стали и называются витыми или ленточными (рис. 2).

Ленточные магнитопроводы с длиной магнитной линии от 0,4 до 1,5 м нашли широкое применение при изготовлении трансформаторов тока, устанавливаемых на установках высокого напряжения. Для напряжений 6 и 10 кВ эти трансформаторы выполняются как ленточными, так и наборными из штампованных Г-образных пластин.

Таблица 4

ГОСТ 802-58	Старые марки	ГОСТ 802-58	Старые марки
Э11	Э1, Э1А	Э45, Э47	ВП1, ВП2
Э12	Э2АА; Э1АБ; Э1АЛБ	Э46, Э48	ВП3
Э21	Э2, Э2Б	Э44	ВЧ1, ВЧ2
Э31	Э3, Э3А	Э310	ХВН
Э41	Э4, Э4А	Э320	ХТ18
Э42	Э4АА	Э330	ХТ18,5

Магнитопроводы, выполненные из штампованных пластин, собираются так, чтобы зазоры чередовались со сплошными пластинами (вперекрышку). Так как каждая пластина имеет по два зазора, то на пути магнитного потока будет четыре стыка. Часть магнитного потока проходит через зазор, но большая часть потока переходит по плоскости соприкосновения в соседние пластины, что значительно повышает индукцию в этих пластинах, уве-

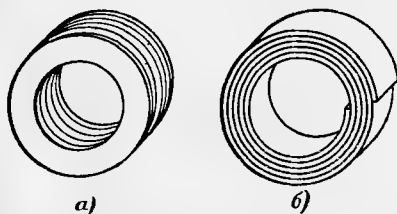


Рис. 2. Торроиды — кольцевые магнитопроводы.

а — наборный из штампованных колец;
б — ленточный или витой.

личивая ток намагничивания. Таким образом, на пути магнитного потока имеются четыре участка повышенного сопротивления.

Для ориентировочной оценки повышения напряженности в этих стыках можно сравнить характеристики намагничивания, снятые до значительных кратностей напряженностей (до 100 *ав/см*) на ленточных магнитопроводах и наборных из Г-образных пластин.

На рис. 3 приведены заводские усредненные характеристики для некоторых марок стали. Характеристики 1 и 2 даны двойными линиями, верхние соответствуют лучшим сталям, нижние худшим.

Характеристики кривой 2 построены для магнитопроводов со средней длиной магнитного пути 45 см. Магнитодвижущая сила сердечников из Г-образных пластин, имеющих стыки, как и в ленточных сердечниках, отнесена к длине магнитного пути в стали, в то время как значительная часть этой напряженности падает на преодоление повышенного сопротивления в стыках пластин. Сравнивая кривые 1 и 2, можно приближенно определить потери в стыках. Так, при индукции 1,0 тл ток намагничивания кривой 2 (по усредненной кривой, показанной пунктиром) более чем в 2 раза превышает ток намагни-

чивания кривой 1 ($1,8-0,7$ аВ/см). Конечно, сам зазор составляет доли миллиметра, но следует учитывать и прилегающие участки пластин, где происходит переход

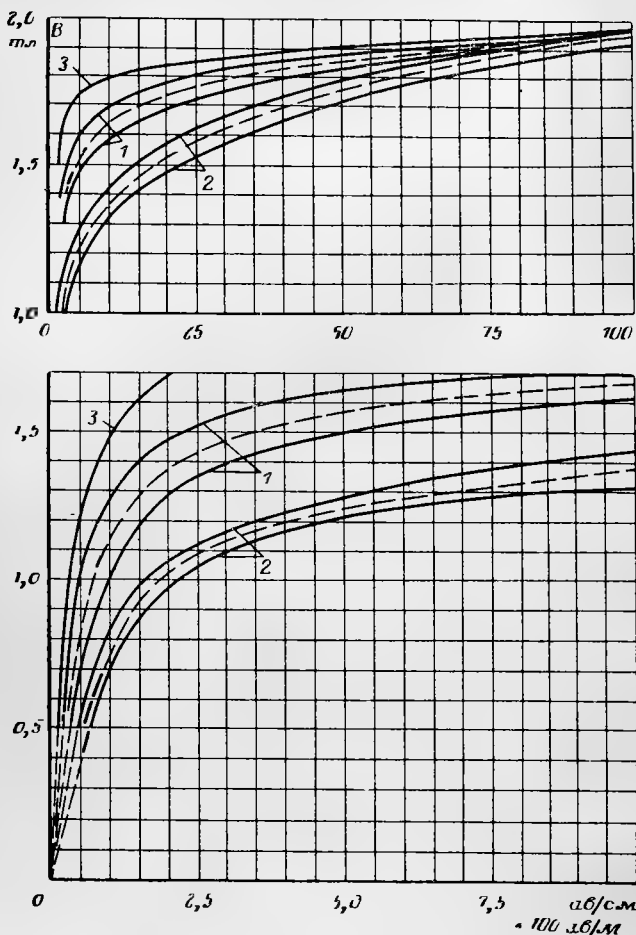


Рис. 3. Заводские характеристики сталей.

1 — магнитопровод ленточный, сталь Э41, Э42; 2 — наборный, из штампованных Г-образных пластин, сталь Э11, Э42, Э15, Э16, Э47, Э48; 3 — ленточный, сталь Э310.

потока в сквозные пластины. При этом поток в сквозных пластинах должен доходить до 2 тл, но так как даже при напряженности 300 аВ/см индукция этих сталей не пре-

Индукция B , $тл$	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7
H_1	0,3	0,5	0,7	1,2	1,4	3,5	6,5	10,0
H_2	0,6	1,2	1,8	4,0	11,5	17,0	27,5	40,0
H_c	0,3	0,7	1,1	2,8	10,1	13,5	21,0	30,0
$K_c = \frac{H_c}{H_1}$	1,0	1,4	1,57	2,33	7,23	3,9	3,25	3,0

231969
 вышает 1,9 тл и проницаемость стали приближается к проницаемости воздуха, неизбежны большие потоки рассеяния. Как ясно из сравнения кривых, рабочая индукция при ленточном магнитопроводе может быть принята более высокая, так как при 2,5 ав/см индукция кривой 1 будет 1,4 тл, кривой 2 — 1,1 тл. Разность между напряженностями характеристик 2 и 1 (при одинаковой индукции) определяется повышенным сопротивлением стыков. Обозначим H_c напряженность в стыках, H_1 — напряженностями характеристик 2 и 1 (при одинаковой H_2 — напряженность, определяющую характеристику 2. Сравнительные данные сведем в табл. 5.

Коэффициент K_c определяет отношение H_c к H_1 . Наибольшее значение коэффициента соответствует индукции несколько большей 1,4 тл. При дальнейшем увеличении индукции значение K_c снижается и в пределе стремится к нулю, что соответствует значению индукции, находящемуся далеко за пределами рабочей части характеристики.

Так как сопротивление стыков определяется повышенным значением индукции в стыках и при этих индукциях характеристики всех сталей сближаются (рис. 3), потери в стыках мало зависят от качества сталей и при наличии в магнитопроводе стыков входят как постоянный и весьма значительный компонент, уравнивающий стали повышенного и пониженного качества (что видно по кривым 2). Так как в трансформаторах, имеющих меньшие размеры, величина тока намагничивания определяется в основном стыками пластин, рабочие индукции в малых трансформаторах принимаются намного меньше, чем в трансформаторах большой мощности.

Штампованные пластины для магнитопроводов. Большинство трансформаторов малой

мощности выполняется на магнитопроводах двух типов. броневого — собранном из Ш-образных пластин и стержневом — собранном из П-образных, Г-образных и прямоугольных пластин. Пластины штампуются из листовой стали толщиной 0,35 и 0,5 мм соответствующей конфигурации.

У броневых трансформаторов (рис. 4) средний стержень является основным, на нем помещается обмотка

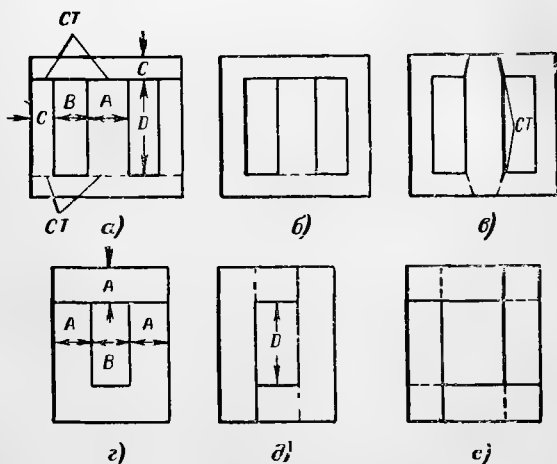


Рис. 4. Пластины стали для магнитопроводов.
а-в — броневые Ш-образные; г-е — стержневые: П-образный, Г-образный, наборный из прямоугольных пластин;
СТ — стыки в магнитопроводе.

(обычно на каркасе). Пластины собираются вперекрышку, так чтобы зазоры в пластинах располагались поочередно с разных сторон обмотки. У пластин, показанных на рис. 4,а, перемычка (замыкающая сторона) является отдельной деталью. У пластин, приведенных на рис. 4,б и в, перемычка составляет одно целое с основной пластиной. Сборка всех пластин стержневого магнитопровода производится вперекрышку.

Рассмотрим соотношение размеров магнитопровода. Основными размерами являются: ширина основного стержня A и толщина пакета магнитопровода B (на рис. 4 не показан).

Их произведение $AB = S_c$ — сечение стали магнитопровода. Ширина окна магнитопровода B , его длина D — сечение окна магнитопровода: $BD = S_0$.

Приведем ориентировочные соотношения остальных размеров магнитопровода. Толщину пакета обычно принимают $B = (1 \div 2) A$. Для Ш-образных пластин ширина крайних стержней (и перемычек) принимается $C = (0,5 \div 0,6) A$. Для стержневых магнитопроводов ширину окна для однокатушечных трансформаторов принимают $B = (1 \div 1,5) A$, для двухкатушечных $B = (1,5 \div 2,5) A$. Длину окна принимают $D = (2 \div 3) A$. Надо иметь в виду, что эти соотношения в ряде случаев могут значительно отличаться от приведенных.

Выше было показано влияние стыков магнитопровода на сопротивление магнитного пути. Рассмотрим Ш-образные пластины. Чаще всего применяются пластины, показанные на рис. 4,а, реже — на рис. 4,б. Пластины, показанные на рис. 4,в, раньше встречались часто, но в последнее время применяются редко. Магнитопровод, собранный на пластинах, приведенных на рис. 4,б и в, имеет по два стыка на пути магнитного потока; магнитопровод, собранный на пластинах, показанных на рис. 4,а имеет четыре стыка. При ширине крайних стержней, 0,6 среднего индукция в крайних стержнях (и в перемыкающих сторонах) снижена на 20% индукции в основном стержне. Следовательно, если в последнем индукция 1,2 тл, то в крайних стержнях 1 тл. В таком случае сопротивление в стыках с индукцией 1 тл будет примерно в 2 раза меньше сопротивления в стыках с индукцией 1,2 тл (рис. 3, кривая 2). В магнитопроводе на пластинах, показанных на рис. 4,б, оба стыка приходятся на участки с индукцией 1,2 тл. Сопротивление стыков не зависит от ширины крайних стержней. В пластинах на рис. 4,в стыки приходятся на участки с пониженной индукцией. Сопротивление стыков снижается почти вдвое. На пластинах рис. 4,а из четырех стыков два стыка приходятся на участки с пониженной индукцией. Сопротивление меньше, чем при ширине крайних стержней, равных 0,5 ширины среднего стержня, но больше, чем на пластинах рис. 4,б, и значительно больше, чем на пластинах рис. 4,в. Но и при ширине крайних стержней 0,5 среднего пластины рис. 4,в имеют преимущество против пластин рис. 4,б в более простой сборке и возможности применения каркаса нормальюй длины.

Стержневые магнитопроводы (рис. 4,з, д) имеют четыре стыка. Оба стержня выполняются обычно одинаковой ширины независимо от того, являются один или оба рабочими (имеющими обмотку). В отношении их остается в силе то, что сказано о Ш-образных пластинах. Магнитопровод из прямоугольных пластин (рис. 4,е) имеет настолько большой ток намагничивания, что не может

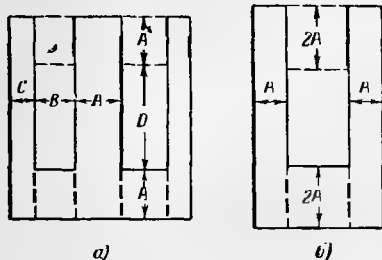


Рис. 5. Пластины стали с уширенными основаниями.

а — Ш-образные; б — П-образные.
Пунктиром указаны нижние пластины.

качественной сборке зазор может увеличиться, что приведет к увеличению тока намагничивания. Особенно некачественная штамповка сказывается на сборке пластин по рис. 4,б. Так как стыки приходятся на концы гильзы каркаса, то в этих местах получается вздутие, снижающее плотность сборки пакета.

Рассмотрим магнитопровод, собранный на Ш-образных пластинах, изображенных на рис. 5,а. Эти пластины от ранее приведенных отличаются отсутствием верхней замыкающей пластины. Нижняя перемычка выполняется той же ширины, что и средний стержень. Собираются пластины вперекрышку. Сверху и снизу с торца получается решетка с продольными просветами. Сечение стали по всему магнитопроводу получается одинаковым, кроме углов, где сечение вдвое больше. Переход потока в поперечные пластины происходит по плоскости соприкосновения пластин, которая составляет для магнитного потока величину

$$A^2(n-1), \text{ где } n — \text{число пластин в пакете.}$$

Если в пластинах по рис. 4 переход потока в соседние пластины создавал участки повышенного сопротив-

ления, то в магнитопроводе на пластинах по рис. 5 индукция на участках перехода потока почти в 2 раза ниже индукции в стержнях, поэтому переход потока в соседние пластины не приводит к увеличению тока намагничивания. Аналогично выполняются и стержневые трансформаторы. При этом перемикающие стороны должны иметь ширину, равную двойной ширине стержня, т. е. $2A$. Площадь соприкосновения увеличивается по сравнению с Ш-образными магнитопроводами до величины $2A^2(n-1)$.

Следует сказать, что пластины такой конфигурации применялись в отдельных редких случаях уже давно¹. Но их применение определялось стабильностью магнитопровода и постоянством тока намагничивания, практически не зависящего от качества штамповки и сборки, чем эти пластины выгодно отличаются от пластин по рис. 4. Кроме того, значительно упрощается сборка магнитопровода.

Но преимущества магнитных характеристик этой конфигурации оставались долгое время без внимания. Конечно, когда при пластинах по рис. 4 необходимо снижать индукцию на 20—25%, а для малых трансформаторов на 40—50% так, чтобы индукция в стыках в сквозных пластинах не превышала допустимую, характер изменения тока намагничивания остается также неизменным. Трансформатор работает удовлетворительно, но сталь используется неполноценно.

Сплавы пермаллоя. Только после появления листовых магнитных материалов с очень малыми потерями (с узкой петлей гистерезиса), с резким переходом характеристики в область насыщения начали внедряться различные устройства автоматики, магнитные преобразователи, магнитные усилители, импульсные схемы и другие устройства; при этом выявилась полная непригодность магнитопроводов, имеющих стыки на пути магнитного потока.

Для выяснения возможности использования новых магнитных материалов не только в виде торрандов, но и с применением пластин стали, более удобной по технологии, проводились испытания и у нас в Союзе, и за ру-

¹ Чебоксарский электроаппаратный завод применял данную конфигурацию пластин в специальных трансформаторах для обеспечения их стабильности (независимости от сборки) еще в 1950 г.

бежом¹. Испытания проводились на различных сталях с разными конфигурациями пластин. Выводы по испытаниям, проводимым независимо разными авторами, совпали. Торроиды для новых магнитных материалов во многих случаях оказалось возможным заменить магнитопроводами из пластин.

Листовыми материалами с очень высокой начальной проницаемостью и очень малыми потерями являются сплавы пермаллоя. Эти сплавы содержат от 40 до 80% никеля, до 10% легирующих металлов (в некоторых сплавах они отсутствуют), остальное железо. В наименование марки некоторых сплавов входит его состав, например: Н50 (никель 50%, остальное железо), Н79М5 (никель 79%, молибден 5%, остальное железо). Основным качеством сплавов (помимо высокой начальной проницаемости и малых потерь) является высокая линейность начальной части характеристики, резкий переход в насыщенную часть и малая зависимость этой части характеристики от напряженности.

Если для обычной электротехнической стали применение магнитопровода со стыками лишь снижает качество магнитопровода, то при применении таких магнитных материалов, как пермаллой, последний теряет свои основные качества, необходимые для высокоэффективных магнитных преобразователей.

То обстоятельство, что для пермалловых сплавов непригодность устаревшей конфигурации пластин магнитопровода была очевидна, способствовало широкому внедрению для этих материалов новой конфигурации пластин. Некоторые предприятия еще в 1958—1959 гг. ввели новую конфигурацию пластин, а в 1962 г. на эту конфигурацию были введены нормы радиозлектроники и электронной техники НО.666.001 и НО.777.001.

Витые магнитопроводы броневого и стержневого типа. В условиях мелкосерийного производства могут выполняться магнитопроводы витые (ленточные, спиральные). Они изготавливаются как броневого, так и стержневого типа (рис. 6). Для таких магни-

¹ Автором в 1956 г. проводились подобные испытания в ЦЛЭМ Мосэнерго.

Английская фирма Telcon Works в 1961 г. демонстрировала на выставке в Москве (Сокольники) торроиды и штампованные пластины из стали «HCR alloy».

Электрокомпании Швеции и Мюнхена (инженеры Ульрих Крабле и Герхард Гезнихаген) проводили аналогичные испытания.

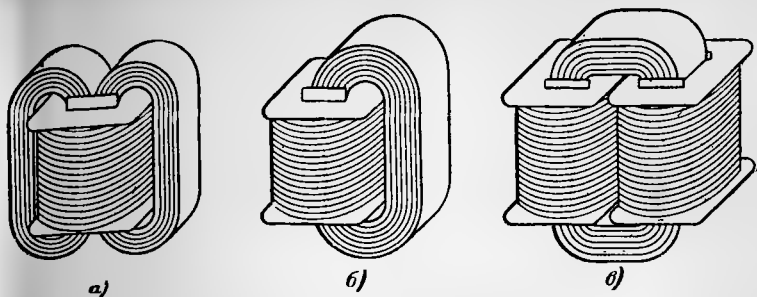


Рис. 6. Ленточные магнитопроводы.

а — броневой тип; *б* — стержневой однокатушечный; *в* — стержневой двухкатушечный.

топроводов лучше всего применять ленточную сталь, например марки Э310, Э320 и др. толщиной 0,35 мм (или 0,2 мм для обеспечения более плотной намотки). От ленты стали отрезаются полосы требуемой ширины. Можно применять и другие марки сталей и отрезать полосы от листа стали. При отсутствии листов требуемой длины полосы можно стыковать. Стыковка выполняется внахлестку (рис. 7), при этом последующий лист перекроет и затянет место стыковки. В местах перегибов рекомендуется прокладывать вкладыши, которые могут быть выполнены из плотного дерева или гетинакса по одному из показанных образцов (в зависимости от толщины листа стали и ширины просвета). Вкладыши обеспечат более плотную намотку сердечника. Намотка ведется до полного заполнения окна каркаса, затем заклинивается полоской гетинакса толщиной 0,5—1,0 мм. При намотке сердечника двухкаркасного магнитопровода полоса стали проходит через оба каркаса (при сборке учесть правильную полярность обмоток). Предварительно, до намотки сердечника, рекомендуется скрепить оба каркаса. Для броневого трансформатора намотка сердечника ведется одновременно двумя лентами, так чтобы они заходили в окно каркаса с одной стороны. Оба полусердечника заклиниваются одной полоской гетинакса.

Преимуществами таких магнитопроводов являются: размер каркаса не ограничен предварительно определенными размерами магнитопровода, в магнитопроводе отсутствуют участки повышенного сопротивления. К недостаткам следует отнести сложность изготовления и ремонта.

В настоящее время ленточные сердечники начинают широко применять в различных устройствах автоматики и электроники. Однако выполнение, приведенное выше, нельзя поставить на конвейер, что является серьезным препятствием. В заводских условиях ленточный сердечник проклеивают, разрезают на две подковки и торцы пришлифовывают. Трансформаторы обычно выполняют

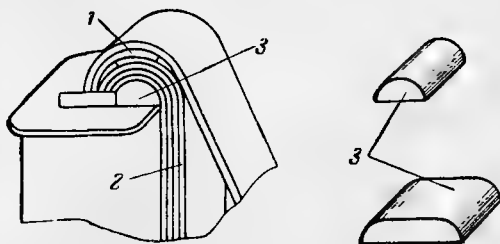


Рис. 7. Стыковка лент стали.

1 - конец первой ленты; 2 - начало второй; 3 - вкладыши.

стержневыми с двумя каркасами. Стыки магнитопровода приходится внутри каркасов. По данным инженеров Ульриха Крабле и Герхарда Гезинхаген, на основании проводимых ими испытаний при шлифовке стыков с точностью до 5 мк сопротивление магнитопровода повышается до 20%. Это значительно меньше, чем на магнитопроводе, имеющем стыки.

В полукустарных мастерских невозможно обеспечить точность подгонки. При ремонте такого трансформатора и наличии коррозии торцов магнитопровода или при недостаточно качественной склейке сердечника качество магнитопровода значительно снизится.

Влияние отверстий для стяжки магнитопровода. Раньше, как правило, пластины снабжались отверстиями для стяжки магнитопровода шпильками. Кроме того, шпильки изолировались от стали и от металлических скоб во избежание образования короткозамкнутых витков. Для этого отверстия пробивались с учетом изоляции. Большинство специализированных предприятий и заводов полностью отказалось от пробивки отверстий для стяжки небольших магнитопроводов, а ряд заводов выполняют стяжку магнитопроводов 100—200 вт и более без пробивки отверстий.

Однако в неспециализированных предприятиях еще широко применяется штамповка пластин с отверстиями. Последние, уменьшая сечение, увеличивают магнитное сопротивление и, следовательно, ток намагничивания. В очень большой степени это сказывается на Ш-образных пластинах с отдельной накладкой (см. рис. 4,а), так как отверстия приходятся на участки, уже имеющие по-

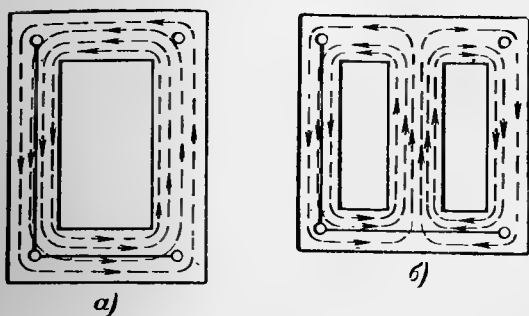


Рис. 8. Распределение магнитных линий в магнитопроводе.

а — в стержневом; б — в бочечном.

вышенное сопротивление, дополнительно повышая его. Особенно это сказывается при ширине крайних стержней 0,5 ширины среднего. У стержневых магнитопроводов сопротивление стыков также велико, но вследствие двойной ширины стержней влияние отверстий значительно меньше.

При применении пластин с уширенным основанием (см. рис. 5), влияние отверстий мало, но при ширине крайних стержней 0,5 среднего сказывается.

Дополнительно следует рассмотреть, насколько обосновано применение изоляции шпилек от стали магнитопровода и от стяжных скоб. На рис. 8,а показано направление магнитных линий в стержневом магнитопроводе. Если все шпильки соединены с каждой стороны магнитопровода стяжными накладками, то от внутреннего угла магнитопровода, где магнитные линии уплотнены, они частично уходят под образованный шпильками и накладками виток, но к следующему углу возвращаются обратно. В каждой половине витка наводится э. д. с., но в обеих половинах эти э. д. с. направлены встречно, при этом тока в витке не будет. Поэтому от-

верстия следует делать по шпилькам без лишних запасов, чтобы не ослаблять сечения стали.

При Ш-образном магнитопроводе поток, выходящий из среднего стержня, расходится в обе стороны (рис. 8,б). Те части потока, которые проходят по наружным сторонам отверстий, предварительно проходят сквозь виток, образуемый стяжными шпильками и накладками, а также пластинами стали, контактирующими со шпильками. Величина потока, проходящего по наружным сторонам отверстий, составляет до 20% полного потока (в зависимости от индукции). Короткозамкнутый виток, образованный шпильками и накладками, может в несколько раз снизить эту часть потока, особенно при увеличении сечения стали, когда э. д. с. витка значительно повышается. При этом повышаются потери. При отсутствии накладок остаются короткозамкнутые витки за счет контактирующих со шпильками пластин стали. Изоляция шпилек от стали и накладок требует увеличения отверстий, что также приводит к увеличению потерь. Надо указать, что эти потери случайны и учету не поддаются.

Стяжка и крепеж трансформатора. Выше было сказано, что пластины стали должны иметь изоляцию. При индукциях ниже 0,9—1,0 тл обычно достаточной изоляцией является окалина. Однако для предохранения от коррозии пластины должны иметь двустороннее покрытие лаком. Практикуемая иногда оклейка пластин бумагой не рекомендуется: снижается заполнение стали и усиливается коррозия. Она применяется в больших трансформаторах, в основном работающих в масле.

Стяжка малых трансформаторов производится чаще всего обоймами или скобами. На рис. 9,а, б показаны стяжка и крепление Ш- и П-образных магнитопроводов обоймами. Обоймы на шасси крепятся лапками (двумя или четырьмя), проходящими в прорези в шасси, либо винтами. Часто магнитопровод в обойме закрепляется свободными лапками — рис. 9,в, г (показаны снизу, без шасси), либо лапки отрезаются. При горизонтальном расположении магнитопроводов (как Ш-, так и П-образных) на шасси их можно крепить скобами (рис. 9,д), а более крупные — стягивать планками и шпильками (рис. 9,е). В последнем исполнении нижняя планка расположена под шасси, что создает более жесткую связь с шасси. При вертикальном креплении магнитопровода

планки, находящиеся снизу, могут заменяться на угольники для крепления на основании.

При применении Ш-образных пластин с уширенным основанием целесообразно для стяжки применять пазы, как показано на рис. 10, а, для крепежных шпилек. Ширина паза выполняется 9—10%, а глубина — 10—11%

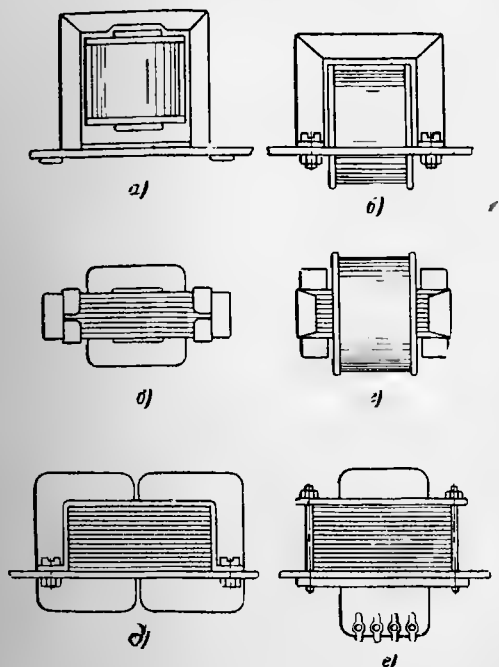


Рис. 9. Стяжка магнитопровода и крепление на шасси.

а—г — обоймами; д — скобами; е — накладками.

ширины пластины (малые размеры выполняются без пазов). Иногда выполняют аналогичные пазы на Ш-образных пластинах обычного выполнения. При пазах создаются значительно меньшие потери, чем при отверстиях, особенно при пластинах с повышенной шириной крайних стержней с замыкающей стороны. Кроме того, при этом короткозамкнутые витки не образуются. Но поскольку при стяжке магнитопровода двумя шпильками неизбежно применение стяжных рамок во избежание вибрации пластин стали, лучше применять форму пластины, показан-

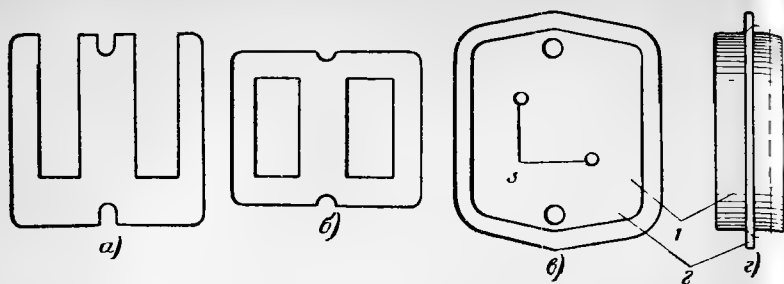


Рис. 10. Пластины стали с пазами для стяжки рамками.
а, б — пластины стали; в, г — оправки (1) с заготовкой (2), направляющие шпильки (3).

ную на рис. 10,б. Для стяжки применять рамки с отбортовкой для жесткости, которые достаточно просто выполняются на двойных оправках из стали 8—10 мм (рис. 10,в, г). Между оправками в тисках зажимается заготовка (из листа стали от 1,2 до 1,8 мм в зависимости от размеров магнитопровода). Заготовка отгибается легкими ударами молотка, и в ней прорезается окно.

Стержневые магнитопроводы мощностью 100 вт и выше проще всего стягивать накладками (или уголками) и шпильками, как показано на рис. 9,е. Но часто, особенно при больших размерах магнитопроводов, их крепят шпильками (или болтами) через отверстия. Такая стяжка проще по технологии и надежна. Хотя это крепление и не создает замкнутых витков, но при установке на шасси (или больших трансформаторов на раме) могут появиться замкнутые витки для части сечения стали от наружной стороны магнитопровода до отверстия за счет шпилек, крепежных скоб и шасси (или рамы), что показано на рис. 11.

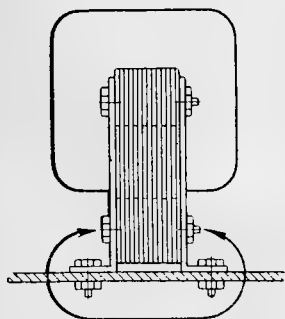


Рис. 11. Установка трансформатора на шасси. Стрелка показывает путь короткозамкнутого витка.

При витых магнитопроводах между магнитопроводом и стяжными скобами следует прокладывать топки прессишпан или гетинакс, не допуская образования замкнутых витков.

3. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Провода. Обмотки трансформаторов малой мощности выполняются обычно проводом круглого сечения. Сортамент применяемых размеров проводов дан в табл. 6. Провода указаны без изоляции.

В настоящее время имеется большое количество марок обмоточных проводов. Провода изготавливаются с волокнистой, эмалевой и комбинированной эмалево-волокнистой изоляцией. Для обозначения марок проводов приняты буквенные обозначения. Первая буква для всех видов изоляции П (провод). Волокнистая изоляция имеет обозначение: Б — хлопчатобумажная пряжа, Ш — натуральный шелк, ШК или К — искусственный шелк (капрон), С — стекловолокно, А — асбестовое волокно. Следующая буква О или Д указывает на один или два слоя изоляции. Провода в эмалевой изоляции обозначаются буквой Э. Комбинированные изоляции состоят из эмалевой изоляции, покрытой дополнительно волокнистой изоляцией.

Основные марки обмоточных проводов даны в табл. 7.

При изготовлении трансформаторов малой мощности в основном применяются провода в эмалевой изоляции. Провода, применяемые наиболее часто, приведены в табл. 8 с размерами по изоляции. Размеры указаны частично, промежуточные определяются по смежным размерам.

Эмальслой должен иметь сплошную и ровную поверхность и обладать достаточной механической прочностью и эластичностью. Эмальслой не должен давать трещин и отставаний от меди при намотке.

Минимальная величина пробивного напряжения приведена в табл. 9.

Высокая механическая прочность и повышенная теплостойкость винифлексовой изоляции, позволяющая значительно снизить количество межслойных прокладок, повысить теплопроводность и допустимую плотность тока, обеспечили проводам марок ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭТВ и др. широкое применение при изготовлении трансформаторов малой мощности.

В настоящее время провода в изоляции из хлопчатобумажной пряжи и бумажной ленты марок ПБД, ПБОО, ПББО и др. широко применяются в силовых трансформаторах средней и большой мощности и в из-

Таблица 6

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²	Вес 1 км, кг	Сопротив- ление 1 км, Ом	Длина 1 км, м	Допустимая нагрузка, а, при	
					2 а/мм ²	3 а/мм ²
0,05	0,00196	0,0175	8 920	0,112	0,00382	0,00598
0,06	0,00283	0,0252	6 180	0,162	0,00566	0,00849
0,07	0,00385	0,0342	4 540	0,220	0,00770	0,01100
0,08	0,00503	0,0448	3 475	0,287	0,0101	0,0151
0,09	0,00636	0,0567	2 750	0,364	0,0127	0,0191
0,10	0,00785	0,0700	2 230	0,448	0,0157	0,0235
0,11	0,00950	0,0847	1 850	0,541	0,0190	0,0285
0,12	0,01131	0,101	1 550	0,645	0,0226	0,0338
0,13	0,01327	0,118	1 320	0,757	0,0265	0,0396
0,14	0,01539	0,137	1 140	0,877	0,0308	0,0462
0,15	0,01767	0,157	993	1,01	0,0353	0,0530
0,16	0,02011	0,179	873	1,15	0,0402	0,0602
0,17	0,0227	0,202	773	1,3	0,0454	0,0681
0,18	0,0255	0,227	686	1,45	0,0510	0,0765
0,19	0,0284	0,253	616	1,62	0,0568	0,0852
0,20	0,0314	0,279	557	1,79	0,0628	0,0942
0,21	0,0346	0,308	507	1,98	0,0692	0,104
0,23	0,0416	0,369	423	2,36	0,0832	0,125
0,25	0,0491	0,436	356	2,81	0,0982	0,147
0,27	0,0573	0,509	307	3,22	0,115	0,172
0,29	0,0661	0,587	265	3,77	0,133	0,198
0,31	0,0755	0,671	233	4,30	0,151	0,227
0,33	0,0855	0,760	205	4,88	0,171	0,257
0,35	0,0962	0,855	182	5,49	0,192	0,289
0,38	0,113	1,01	155	6,45	0,227	0,340
0,41	0,132	1,17	133	7,52	0,264	0,396
0,44	0,152	1,35	115	8,70	0,304	0,456
0,47	0,174	1,54	101	9,90	0,347	0,520
0,49	0,189	1,68	93,1	10,7	0,377	0,566
0,51	0,204	1,82	86,0	11,6	0,408	0,612
(0,53)	0,221	1,96	79,4	12,6	0,442	0,663
0,55	0,238	2,11	73,7	13,5	0,476	0,714
(0,57)	0,255	2,27	68,8	14,5	0,510	0,765
0,59	0,273	2,43	64,3	15,5	0,546	0,819
(0,62)	0,302	2,68	58,1	17,2	0,604	0,906
0,64	0,322	2,86	54,5	18,3	0,644	0,966
(0,67)	0,353	3,13	49,7	20,1	0,706	1,10
0,69	0,374	3,32	46,9	21,3	0,748	1,12
(0,72)	0,407	3,62	43,1	23,2	0,814	1,22
0,74	0,430	3,82	40,8	24,5	0,860	1,29
(0,77)	0,466	4,14	37,7	26,5	0,932	1,40
0,80	0,503	4,47	34,9	28,6	1,006	1,51
(0,83)	0,541	4,81	32,4	30,9	1,08	1,62
0,86	0,581	5,16	30,2	33,1	1,16	1,74
(0,90)	0,636	5,66	27,6	36,2	1,27	1,91
0,93	0,679	6,04	25,9	38,6	1,36	2,04
(0,96)	0,724	6,43	24,3	41,2	1,45	2,17

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²	Вес 1 км, кг	Сопротив- ление 1 км, ом	Длина 1 ома, м	Допустимая нагрузка, а, при	
					2 а/мм ²	3 а/мм ²
1,00	0,785	6,98	22,4	44,6	1,57	2,35
(1,04)	0,849	7,55	20,7	48,2	1,69	2,54
1,08	0,916	8,14	19,2	52,1	1,83	2,75
(1,12)	0,985	8,75	17,82	56,1	1,97	2,96
1,16	1,057	9,40	16,61	60,2	2,17	3,48
(1,20)	1,13	10,05	15,52	64,4	2,26	3,39
1,25	1,23	10,91	14,33	69,8	2,46	3,69
(1,30)	1,33	11,80	13,22	75,7	2,66	3,99
1,35	1,43	12,73	12,28	81,4	2,86	4,29
(1,40)	1,54	13,7	11,40	87,6	3,08	4,62
1,45	1,65	14,7	10,62	94,2	3,30	4,95
(1,50)	1,77	15,7	9,93	101	3,54	5,31
1,56	1,91	17,0	9,18	109	3,82	5,76
(1,62)	2,06	18,3	8,52	117	4,12	6,18
1,68	2,22	19,7	7,90	127	4,44	6,66
(1,74)	2,38	21,1	7,37	136	4,76	7,14
1,81	2,57	22,9	6,83	146	5,14	7,71
(1,88)	2,78	24,7	6,31	158	5,56	8,34
1,95	2,99	26,5	5,88	170	5,98	8,97
(2,02)	3,20	28,5	5,49	182	6,40	9,60
2,10	3,46	30,8	5,07	197	6,92	10,38
2,26	4,01	35,7	4,88	205	8,02	12,03
2,44	4,68	41,6	3,75	266	9,36	14,04
2,63	5,43	48,3	3,23	310	10,86	16,35
2,83	6,29	55,9	2,79	358	12,58	18,87
3,05	7,31	65,0	2,40	416	14,62	21,93
3,28	8,45	75,1	2,08	480	16,90	25,35
3,53	9,79	87,0	1,79	558	19,58	29,37
3,80	11,34	100,8	1,55	645	22,68	34,02
4,10	13,20	117,4	1,31	764	26,40	39,70
4,50	15,90	141,4	1,10	905	31,80	47,70

Примечание. Размеры меди, указанные в скобках, для широкого применения не рекомендуются, применяются для экономии меди (по расчету).

Таблица 7

Марка	Расшифровка марки	Диаметр по меди	ГОСТ или ТУ
ПЭЛ	Провода в эмаливой изоляции		
	Лакостойкий масляно- смоляной эмальлак	0,05—2,44	2773-51*
ПЭЛУ	То же с утолщенной изоляцией	0,05—2,44	2773-51

Марка	Расшифровка марки	Диаметр по меди	ГОСТ или ТУ
ПЭТ	Лакостойкий глифтаде- вый теплоустойчивый	0,38 — 2,44	2773-51
ПЭВ-1	Эмальлак на полиацета- левой и полиамидной ос- нове	0,06 — 2,44	7262-54*
ПЭВ-2	То же двухслойный	0,06 — 2,44	7262-54
ПЭВТЛ-1	Высокопрочная поли- уретановая эмаль	0,06 — 1,56	МРТУ 16.505. 009-64
ПЭВТЛ-2	То же двухслойная	0,06 — 2,44	МРТУ 16.505. 009-64
ПЭЛР-1	Полиамидно-резольный эмальлак	0,1 — 2,44	ТУК ОММ 505. 073-54
ПЭТР-2	То же двухслойный	0,1 — 2,44	ТУК ОММ 505. 073-54
ПЭТВ	Теплоустойчивый высоко- прочный полиэфирный эмальлак № 124	0,06 — 2,44	МРТУ 2-43- 12-61
ПЭМ-1	Металлвин	0,06 — 2,44	10288-62
ПЭМ-2	То же двухслойный	0,06 — 2,44	10288-62
	Эмаль с волокнистой изоляция		
ПЭЛБО	Лакостойкая эмаль в одной хлопчатобумажной обмотке	0,2 — 2,1	6324-52*
ПЭЛЮ	То же, обмотка нату- ральный шелк	0,05 — 2,1	6324-52
ПЭЛКО	То же, капрон	0,05 — 2,1	6324-52
ПЭТСО	Эмальлак винифлекс с одним слоем стеклово- локна, пропитанного на- гревостойким лаком	0,31 — 2,1	7019-60
ПЭТСОТ	То же, стекловолокну тонкослойное	0,31 — 2,1	7019-60
	С волокнистой изоляцией		
ПБО	С одной хлопчатобу- мажной обмоткой	0,2 — 2,1	6324-52*
ПБД	То же с двойной об- моткой	0,2 — 5,2	6324-52
ПСД	Два слоя стекловоло- кна с пропиткой нагриво- стойким лаком	0,31 — 5,2	7019-60
ПСДК	То же с пропиткой кремнийорганическим ла- ком	0,31 — 5,2	7019-60

Марка	Расшифровка марки	Диаметр по меди	ГОСТ или ТУ
ПСДТ	Два слоя стекловолокна тонкослойного с пропиткой нагревостойким лаком	0,31—2,1	7019-60
ПДА	Один слой асбестовой ровницы с пропиткой нагревостойким лаком	1,0—5,2	7019-60

Таблица 8

Диаметр провода по меди, мм	Максимальный диаметр изолированного провода, мм, марок						1	2; 4; 6	3; 5; 7
	ПЭЛ ПЭГ	ПЭЛУ	ПЭВ-1 ПЭМ-1 ПЭВЛ-1	ПЭВ-2 ПЭМ-2 ПЭВЛ-2	ПЭЛР-1	ПЭЛР-2 ПЭТВ			
1	2	3	4	5	6	7			
0,05	0,065	0,075	—	—	—	—	0,51	0,56	0,58
0,06	0,075	0,085	0,085	0,09	—	0,09	0,55	0,60	0,62
0,08	0,095	0,105	0,105	0,11	—	0,11	0,59	0,64	0,66
0,10	0,12	0,135	0,125	0,13	0,12	0,12	0,64	0,69	0,72
0,12	0,14	0,155	0,145	0,15	0,14	0,15	0,69	0,74	0,77
0,14	0,16	0,175	0,165	0,17	0,16	0,17	0,74	0,80	0,83
0,16	0,18	0,195	0,19	0,20	0,19	0,20	0,80	0,86	0,89
0,18	0,2	0,215	0,21	0,22	0,21	0,22	0,86	0,92	0,95
0,20	0,225	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24	0,93	0,99	1,02
0,23	0,255	0,27	0,26	0,28	0,26	0,28	1,0	1,08	1,10
0,25	0,275	0,29	0,28	0,30	0,28	0,30	1,08	1,16	1,19
0,31	0,35	0,37	0,35	0,36	0,35	0,36	1,16	1,24	1,27
0,33	0,37	0,39	0,37	0,38	0,37	0,38	1,25	1,33	1,36
0,38	0,42	0,44	0,42	0,44	0,42	0,44	1,35	1,43	1,46
0,44	0,49	0,51	0,48	0,50	0,48	0,50	1,45	1,53	1,56
0,49	0,54	0,56	0,53	0,55	0,53	0,55	1,56	1,64	1,67
							1,68	1,76	1,79
							1,81	1,90	1,93
							1,95	2,04	2,07
							2,44	2,54	2,57

Примечание. Диаметры проводов соответствующих марок — см. табл. 7.

Диаметр провода, мм	Пробивное напряжение, в, для проволоки марок					
	ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭМ-1	ПЭЛУ	ПЭВ-2	ПЭМ-2
0,05--0,07	350	350	400	450	450	500
0,10--0,13	400	500	600	500	700	800
0,15--0,20	550	600	700	650	800	900
0,23--0,41	800	800	900	1 000	1 000	1 250
0,55--0,8	900	1 000	1 100	1 100	1 500	1 500
0,86--1,35	1 000	1 200	1 300	1 300	1 800	1 800
1,4--2,44	1 250	1 400	1 500	1 600	2 000	2 000

Примечания: 1. Марки проводов ПЭВТЛ-1, ПЭЛР-1 и ПЭТ соответствуют графе марки ПЭВ-1.

2. Марки проводов ПЭВТЛ-2, ПЭЛР-2 и ПЭТВ соответствуют графе марки ПЭВ-2.

мерительных трансформаторах (напряжения и тока), работающих в масле. В таких трансформаторах провода с эмалевым покрытием не применяются.

Для трансформаторов открытого типа, силовых на напряжения до 500 в и трансформаторов тока до 6—10 кв применяются как обмотки проводом ПБД, так и комбинированные с эмалевым и хлопчатобумажным покрытием, но при этом обмотки трансформаторов обязательно пропитываются или компаундируются.

Для сварочных, нагрузочных и других аналогичных трансформаторов и устройств следует применять провода в стеклянной изоляции. Применяют также провода в асбестовой изоляции, но их электрические свойства и прочность значительно хуже, толщина изоляции повышенная, что снижает теплопроводность обмоток. Кроме того, они гигроскопичны. В табл. 7 приведены данные по этим маркам, а в табл. 10 указана толщина их изоляции.

Для указанных выше работ иногда применяют провода прямоугольного сечения. Последние выполняются марок: ПБД, ПБОО, ПСД, ПСДК, ПДА. Толщина и изоляции соответствует маркам круглых проводов — и верхним пределам — или несколько выше.

Из указанных марок проводов для трансформаторов малой мощности применяется провод ПЭЛШО для обмоток на повышенные напряжения (например, в обмотках высокого напряжения осциллографа и в других случаях). ПЭЛШО (и ПЭЛБО) целесообразно применять

Марка провода	Диаметр проволоки, мм										
	0,05—0,1	0,11—0,19	0,2—0,25	0,27—0,29	0,31—0,36	0,41—0,49	0,51—0,60	0,72—0,96	1,0—1,45	1,5—2,1	2,26—5,2
ПЭШО, ПЭЛКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135		
ПВО	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	—
ПВД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,27	0,27	0,33
ПЭЛВО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	—
ПЭТСО	—	—	—	—	0,2	0,2	0,2	0,22	0,22	0,24	—
ПЭТСОТ	—	—	—	—	0,16	0,16	0,16	0,18	0,2	0,21	—
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,33
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	—
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3	0,3	0,35

Примечание. Толщина изоляции дана на обе стороны.

при галетной намотке малых трансформаторов, пропитываемых склеивающими компаундами, ввиду высокой схватываемости волокнистых материалов с большинством склеивающих компаундов. Провод ПЭШО применяется широко в контурах радиоприемных устройств, но

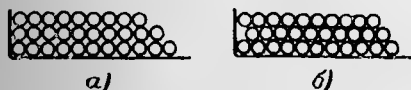


Рис. 12. Намотка слоев провода.

а — «шахматная»; б — «сотовая».

пригодность той или иной пропитки (и других материалов) определяется фактором потерь, что для частоты 50 гц не существенно.

Для упрощения расчетов обмоток в табл. 11 указано количество витков, приходящихся на 1 см² сечения обмотки для разных марок провода. Приведена часть размеров провода. Для промежуточных размеров количество витков определяется по двум смежным размерам. Следует указать, что количества витков даны с учетом плюсовых допусков. Кроме того, витки подсчитаны из учета плотной намотки при «шахматной укладке» провода (рис. 12,а), когда площадь, занимаемая проводом, равна квадрату диаметра провода d^2 , где d — диаметр провода в изоляции. Провода диаметром выше 0,7—0,8 мм укладываются плотнее — «сотовая укладка» (рис. 12,б). Выражение «сотовая укладка» не следует

Таблица 11

Диаметр провода, мм	Число витков на 1 см ² сечения обмотки провода в эма- ль- изоляции	Диаметр провода, мм	Число витков на 1 см ² сечения обмотки провода в эма- ль- изоляции
0,1	6 100—5 000	0,74	145—137
0,12	4 200—3 500	0,80	127—120
0,14	3 350—3 000	0,86	110—105
0,16	2 800—2 300	0,93	93—91
0,18	2 300—1 850	1,00	82—79
0,20	1 800—1 550	1,08	71—68
0,23	1 450—1 250	1,16	62—59
0,27	1 050—900	1,25	53—51
0,31	800—750	1,35	47—45
0,35	680—580	1,45	40—39
0,41	450—410	1,56	35—34
0,47	350—320	1,68	30—29
0,51	310—290	1,81	26—25
0,55	270—250	1,95	23—23
0,59	235—225	2,10	19—19
0,64	200—185	2,26	17—17
0,69	175—165	2,44	15—15

Примечание. Левые значения соответствуют маркам ПЭМ-1, ПЭВ-1, ПЭЛ; правые — маркам ПЭМ-2, ПЭВ-2, ПЭЛУ и соответственно другим маркам.

Таблица 12

Класс нагрево- стойкости	Нагревостой- кость матери- ала данного класса, °С	Электроматериалы, соответствующие классам нагревостойкости
У	90	Электроматериалы из целлюлозы, шелка, хлопчатобумажные и другие аналогичные не пропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал Провода: ПБД, ПБО, ПЭШО, ПЭБО
А	105	Электроматериалы класса У, пропитанные изоляционными лаками, компаундами, и другие соответствующие данному классу материалы Провода: ПЭЛ, ПЭЛУ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2
Е	120	Некоторые синтетические пленки и другие соответствующие данному классу материалы Провода: ПЭТ, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2

Класс нагревостойкости	Нагревостойкость материала данного класса, °С	Электроматериалы, соответствующие классам нагревостойкости
В	130	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна на органических подложках, некоторые синтетические пленки и другие соответствующие данному классу материалы Провода: ПЭЛР-1, ПЭЛР-2, ПЭТВ, ПЭТСО, ПЭТСОТ
Ф	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна на синтетических связующих и другие материалы данного класса Провода: ПСД, ПСДТ, ПДА
Н	180	Те же, материалы, применяемые в сочетании с кремнийорганическими соединениями, и другие соответствующие материалы Провод: ПСДК
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц Провод: ПСДК (до 200°С)

смешивать с сотовыми обмотками, применяемыми для радиоаппаратуры.

Все электроизоляционные материалы и провода в изоляции по нагревостойкости в соответствии с ГОСТ 8865-58 разбиты на классы, приведенные в табл. 12.

Из приведенных классов нагревостойкости класс У может применяться только для изделий бытовых (общего пользования) и технических, не требующих количественной оценки надежности. Однако достаточна предварительная пропитка всех целлюлозных, шелковых материалов (без пропитки обмотки в целом) — и изделие переходит в класс А.

По существу классы нагревостойкости начинаются с класса А, принятого большинством заводов как нижний класс нагревостойкости. Класс А является основным и для трансформаторов малой мощности. Иногда применяется и класс Е.

В тех случаях, когда одним из основных требований к аппаратуре (трансформатору) является надежность, обмотку обязательно следует пропитывать каким-либо лаком или компаундом. Значительному повышению надежности способствуют облегченные режимы работы об-

моток и применение материалов, имеющих температуру по нагревостойкости на 1—2 класса выше рабочей температуры обмотки.

В тех случаях, когда трансформатор может работать в форсированном режиме, обмотка должна пропитываться, так как при этом повышается теплопроводность и нагревостойкость за счет более равномерной температуры в толще обмотки. При форсированном режиме допустимо повышать нагрев трансформатора на $10\text{--}12^\circ\text{C}$ сверх температуры данного класса. При этом ускоряется процесс старения материала примерно (в среднем) в 2 раза. Надо указать, что допустимые температуры для проводов ПЭЛ, ПЭЛУ $100\text{--}105^\circ\text{C}$, ПЭТ 125°C , ПЭВ-1, ПЭВ-2 110°C . Для трансформаторов, к которым предъявляются требования надежности, форсированные режимы недопустимы.

Приведенная шкала классов нагревостойкости принята как у нас в Союзе, так и в ряде зарубежных стран.

Нижний предел допустимых температур для эмалированных проводов -60°C . При этой температуре эмаль не должна трескаться и отставать от меди.

Электроизоляционные материалы, как показывает само название, должны обеспечивать электрическую изоляцию между отдельными токопроводящими элементами электрических устройств, находящихся под разным потенциалом.

При повышении напряжения (разности потенциалов), приложенного к изоляции, наступает критическое значение напряжения, при котором изоляция пробивается. Это значение напряжения именуется *пробивным напряжением*, а свойство изоляции выдерживать длительно определенное напряжение называется *электрической прочностью*.

Пробивное напряжение относят обычно к 1 мм (или 1 см) толщины изоляции. С повышением температуры электрическая прочность снижается, так, например, электрофарфор при перепаде температуры от 20 до 100°C снижает электрическую прочность на 30% и практически теряет электрическую прочность при 350°C .

Наличие воздушных прослоек в изоляции приводит к ионизации воздуха и снижению электрической прочности изоляции.

Влажность материала также значительно снижает электрическую прочность, так, например, при влажно-

сти трансформаторного масла 0,01% пробивное напряжение снижается с 20 до 6,4 кв/мм.

Обычно в трансформаторах малой мощности (за некоторыми исключениями) запас по пробивному напряжению очень велик, но может быть тепловой или электрохимический пробой.

Электроизоляционные материалы не должны пропускать ток. Практически, находясь под напряжением, они пропускают незначительный ток, называемый током утечки. Величина этого тока определяется приложенным напряжением и сопротивлением изоляции.

Ток утечки, проходя по изоляции, нагревает ее, что приводит к снижению пробивного напряжения. Помимо этого, при прохождении тока утечки в изоляции развиваются электрохимические процессы, приводящие к уменьшению сопротивления изоляции (старению изоляции) и еще большему увеличению тока утечки. В конечном результате это приводит к тепловому пробоем (за счет нагрева изоляции) или к электрохимическому пробоем. Ускоряет старение изоляции наличие влаги в атмосфере и в очень большой степени — наличие активных газов.

Токи утечки могут проходить как через толщу материала, так и по его поверхности. Величина тока, проходящего через толщу материала, определяется его *объемным сопротивлением*, проходящим по его поверхности, — *поверхностным сопротивлением*. Удельное объемное сопротивление ρ_v , *ом·см* численно равно сопротивлению в омах кубического сантиметра материала при напряжении, приложенном к двум противоположным граням двумя электродами площадью 1 *см²*. Последние имеют плотный контакт с гранями кубика. Поверхностное сопротивление боковых граней кубика исключается схемой испытания.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s , *ом*, равно сопротивлению квадрата на поверхности материала между электродами, имеющими контакт с противоположными сторонами квадрата (сопротивление не зависит от размера квадрата).

Объемные сопротивления различных изоляционных материалов — диэлектриков составляют величины от 10^9 до 10^{20} *ом·см*, поверхностные — от 10^8 до 10^{18} *ом*. Объемное сопротивление более стабильно. Во влажном воздухе диэлектрики в зависимости от гигроскопичности

снижают свое объемное сопротивление, впитывая влагу. Скорость впитывания может колебаться в очень широких пределах; от часов (для непропитанных хлопчатобумажных материалов) до месяца и более.

Поверхностное сопротивление быстро реагирует на изменение влажности воздуха. Кроме того, оно в значи-

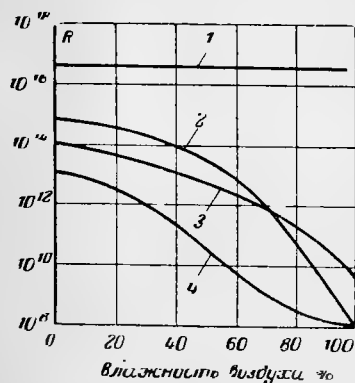


Рис. 13. Зависимость поверхностного сопротивления изоляционных материалов от влажности воздуха.

1 — парафин; 2 — шеллак; 3 — стеклолента (непропитанная); 4 — фарфор.

тельной степени зависит от характера поверхности материала и его запыления. На глянцевой поверхности меньше оседает влаги, и она меньше подвержена загрязнению.

Гигроскопичность изоляционных материалов определяется по количеству влаги (в процентах к весу материала), которую впитывает данный сухой материал, помещенный в насыщенную водяными парами атмосферу (обычно при температуре 20°C на время 24 ч). Для некоторых материалов важна степень *влагопоглощаемости*, которая определяется

аналогично гигроскопичности, но при помещении материала в дистиллированную воду. В отдельных случаях определяется и гигроскопичность и влагопоглощаемость.

Большинство материалов обладает *смачиваемостью*. Капля воды на поверхности материала растекается в большей или меньшей степени (в зависимости от смачиваемости данного материала). Эти материалы называются «гидрофильными». Если капля растекается равномерно по всей поверхности, смачиваемость называют «абсолютной».

Другая группа материалов называется «гидрофобными» (в обиходе «водоотталкивающими»). К ним относится группа так называемых «воскообразных» диэлектриков и некоторые другие. На их поверхности влага собирается мелкими каплями (как капли ртути на стекле), образуя прерывистую пленку. На рис. 13 приведены сравнительные характеристики поверхностных сопротивлений для некоторых типов диэлектриков.

Гидрофобные диэлектрики хорошо предохраняют обмотки от действия влаги. Возможности их применения в тех или иных случаях определяются их остальными свойствами.

Одно из основных свойств диэлектриков, к которым приходится сталкиваться при изготовлении малых трансформаторов, — это *теплопроводность*. Коэффициент теплопроводности (называемый также «удельная теплопроводность») определяется количеством тепла в ваттах, которое проходит через кубический сантиметр данного материала от одной грани к противоположной при разности температур между этими гранями 1°C . Выражается коэффициент теплопроводности в ваттах на 1 см на 1°C , может быть выражен в джоулях или калориях ($1\text{ вт/см}\cdot^{\circ}\text{C}=1\text{ дж/см}\cdot\text{сек}\cdot^{\circ}\text{C}=0,2389\text{ кал/см}\cdot\text{сек}\cdot^{\circ}\text{C}$). Ниже приведены значения коэффициента теплопроводности для некоторых материалов.

Материал	Коэффициент теплопровод- ности, $\text{вт/см}\cdot^{\circ}\text{C}$
Медь	2,93—4,10
Сталь	0,45—0,48
Слюда	0,005—0,006
Миканиты	0,0021—0,0041
Гетинаксы, текстолиты, стеклотекстолиты	0,0017—0,00175
Шеллак	0,0018—0,0022
Глифталевые смолы	0,0012—0,0015
Полихлорвиниловые смолы	0,0018—0,0020
Формальдегидные смолы (бакелиты)	0,0015—0,0018
Электрокартон ЭВ непропитанный	0,0015—0,0018
Электрокартон ЭВ пропитанный	0,0023
Хлопчатобумажная ткань	0,0007
То же, пропитанная лаком	0,0012—0,0025
Лакоткань	0,0012—0,0013
Воздух (тонкие зазоры)	0,00025—0,0005

Помимо требований надежности и других дополнительных требований, определяющих применение тех или иных электроизоляционных материалов, при выборе последних необходимо учитывать климатические и другие местные условия. По условиям работы аппарата может иметь следующие исполнения.

Нормальное исполнение предназначено для работы аппаратуры в условиях нормальной влажности (см. ниже) при отсутствии в воздухе активных газов, температуре воздуха от $+25$ до $+45^{\circ}\text{C}$, т. е. в основном для аппаратуры, работающей в закрытых и отапливаемых помещениях. В тех случаях, если эти изделия имеют наи-

более низкий уровень надежности, как, например, многие технические устройства, неотвественные электронные устройства и другие устройства широкого профиля, обмотки трансформатора обычно не пропитываются, что упрощает и удешевляет их изготовление и ремонт. Но в различных испытательных, нагрузочных и других устройствах (в основном предназначенных для разъездных работ), трансформаторы которых часто могут работать в форсированном режиме, обмотки независимо от требуемого уровня надежности следует пропитывать теплостойкими лаками. Это увеличивает теплопроводность обмоток и способствует повышению возможности их форсировки. Обмотки трансформаторов всех устройств, к которым предъявляются повышенные требования надежности, следует обязательно пропитывать. Это значительно повышает также и долговечность изделия.

Влагостойкое исполнение особенно необходимо в местах с жарким и сырым климатом. Количество влаги в воздухе зависит от температуры воздуха и от степени влажности. В 1 м^3 воздуха при его насыщении находится воды в виде пара при температуре 0; 20; 40; 60° С соответственно 6; 24; 75; 130 г. Нормальной влажностью считается воздух, содержащий 60—65% влаги от предела насыщения, сырым — содержащий более 80%, сухим — менее 40%. При повышенной температуре воздуха нормальной влажности соответствует значительно большая абсолютная влажность, т. е. количество влаги в 1 м^3 воздуха.

При охлаждении воздух нормальной влажности становится пересыщенным и избыточный пар оседает в виде капель в порах обмотки, в зазорах стали магнитопровода, вызывая необратимое электрохимическое разрушение изоляции и коррозию стали магнитопровода и меди обмоток, часто приводящую к разъеданию и обрыву проводов (особенно частых при диаметрах менее 0,1 мм). Влагостойкое исполнение следует применять к обмоткам на гидроэлектростанциях, на торфяных болотах, в насосных, котельных. Применением соответствующих пропиток можно значительно снизить действие влаги.

Химостойкое исполнение применяется при наличии в воздухе активных газов. Последние приводят к таким же разрушениям, к каким приводит влага, но процесс протекает значительно интенсивнее, особенно в сочетании с влагой. Химостойкое и тропическое выполне-

ния примерно аналогичны. В обоих случаях хлопчатобумажные и целлюлозные материалы, а также провода ПЭЛ, ПЭЛУ, ПЭВ-2 не применяются. Применяются стеклоткани и стеклотекстолиты. Предъявляются более повышенные требования к пропиточным лакам.

Для тропиков, кроме того, учитывают специфичные для тех или иных областей реагенты, в том числе микроорганизмы, разрушающие некоторые электролаки и материалы. В ряде случаев необходима консультация химиков.

При влагостойком, химостойком (и тропическом) выполнении пропитка всех обмоток обязательна, режимы нагрева трансформатора должны быть снижены.

К волокнистым электронизоляционным материалам относятся изделия хлопчатобумажные, шелковые, из древесной целлюлозы, а также нагревостойкие из стекловолокна и асбестового волокна.

Материалы первой группы, применяемые без пропитки, относятся к классу нагревостойкости У, допускающему максимальную температуру не выше 90°C . Следует указать, что целлюлозные материалы разлагаются в присутствии кислорода воздуха и при нормальной температуре, но за время, исчисляемое годами. При температуре выше 90°C процесс разложения резко убыстряется. Пропитка заполняет поры в этих материалах, уменьшая значительно поверхность соприкосновения с воздухом.

Из второй группы нагревостойких волокнистых материалов широкое применение нашли стекловолокнистые изоляции, имеющие высокие электрические свойства, малую гигроскопичность и высокую прочность. Асбестовые волокнистые материалы в качестве электронизоляционных материалов почти полностью вытеснены стекловолокном.

Из древесной целлюлозы и хлопчатобумажного волокна изготавливаются картоны ЭВ (электрокартон воздушный целлюлозный) и ЭВТ (то же тряпичный) и другие картоны для работы в масле. Картоны изготавливаются толщиной от 0,1 до 3 мм. В бытовых трансформаторах картоны применяются для изготовления каркасов для обмоток.

Из бумаг применяются кабельная марок К-08, К-12, К-17 (толщиной 0,08; 0,12; 0,17 мм) для межелейных и межобмоточных прокладок в обмотках, конденсаторная

марок от А-7 до А-24 (от 7 до 24 *мк*), часто используется бумага от разобранных конденсаторов, пропитанная церезином или головаксом. Пропиточная бумага толщиной 0,12 *мм* может быть рекомендована для межслойных прокладок в обмотках, подлежащих пропитке.

Хлопчатобумажное волокно применяется для изготовления лент и электроизоляционных тканей. Ленты: киперная (толщиной 0,54 *мм*), тафтяная, миткалевая, батистовая (0,22 *мм*). При изготовлении малых трансформаторов батистовая лента иногда применяется для оплетки галетных обмоток.

Из электроизоляционных тканей применяются в основном: перкаль в производстве лакотканей, миткаль и бязь в производстве текстолита. Шелковая ткань иногда применяется для межслойной и межобмоточной изоляции (с последующей пропиткой), чаще применяется шелковая лакоткань. Ткань типа шифон применяется в производстве текстолита марки ВЧ.

Стекловолокно применяется для изготовления лент и тканей. Ленты изготавливаются толщиной 0,1 *мм* (и тоньше) при ширине от 8 до 25 *мм*, ткань изготавливается толщиной от 0,1 до 0,06 *мм*, для специальных изделий до 0,025 *мм*. Для электроизоляции применяется бесщелочное волокно. В табл. 13 приведены для сравнения неко-

Таблица 13

Параметры и свойства	Лента стек- лянная	Лента хлопчато- бумажная	Лента ас- бестовая
Ширина, <i>мм</i>	25	25	25
Толщина, <i>мм</i>	0,12	0,2	0,4
Гигроскопичность, %	0,98	18	6,9
Водопоглощаемость, %	11,8	85	75
Прочность на разрыв, <i>кг/мм²</i>	19,8	3,6	0,96
Объемное сопротивление ρ_v , <i>ом·см</i>	10^{14}	10^8	
Поверхностное сопротивление ρ_s , <i>ом</i>	10^{12}	10^7	$3 \cdot 10^6$

торые данные непропитанных лент и электрические данные для сухих лент.

Обозначения лакотканей в марках следующие: первая буква Л — лакоткань, вторая Х, Ш, К, С — хлопчатобумага, шелк, капрон, стекловолокно, третья буква для хлопчатобумаги и шелка обозначает обычно цвет (С, Ч — светлая, черная), для стекловолокна — материал пропитки. Иногда бывают отклонения в обозначении, на-

пример ЛБ — лакоткань хлопчатобумажная светлая, бензонасосная.

Хлопчатобумажные лакоткани имеют марки ЛХС, ЛХСМ, ЛХСС, ЛХЧ; толщина лакоткани от 0,15 до 0,24 мм. Шелковые (капроновые) лакоткани имеют марки ЛШС, ЛШСС, ЛКС, ЛҚСС, толщина от 0,05 (ЛШСС) до 0,15 мм. Нагревостойкость лакотканей относится к классу А (ГОСТ 2214-60).

На основе стеклоткани (ГОСТ 10156-62) выпускаются лакоткани марок ЛСМ, ЛСММ с нагревостойкостью класса А. Лакоткани марок ЛСЭ и ЛСБ имеют нагревостойкость класса В, марки ЛСК, ЛСКЛ, ЛСКР (на кремнийорганическом лаке) имеют нагревостойкость класса Н. Толщина стеклотканей от 0,11 до 0,24 мм, за исключением марки ЛСК, имеющей толщину от 0,05 мм.

Стеклолакоткани с нагревостойкостью класса Н в условиях эксплуатации выдерживают температуру до 200° С, а кратковременно в течение 2—3 ч — до 250° С.

Помимо этих марок стеклотканей, выпускаются марки по техническим условиям министерств и заводов.

Для бытовых трансформаторов применяются хлопчатобумажные и шелковые лакоткани. Для трансформаторов, к которым предъявляются высокие требования надежности, рекомендуется применять стеклолакоткани. Для сырых помещений можно применять лакоткань ЛХЧ (черная) с масляно-битумной пропиткой. Эта лакоткань не маслостойка, но она более влагостойка и меньше склонна к старению, чем светлые хлопчатобумажные и шелковые лакоткани.

Широкое применение имеют прессованные слоистые материалы, состоящие из нескольких слоев основы, пропитанной соответствующими смолами (лаками) и спрессованными при определенных температуре и давлении. В качестве основы применяют древесные и растительные волокна, стекловолокно, асбестовое волокно.

При изготовлении каркасов для обмоток в основном применяют листовые материалы, состоящие из нескольких слоев бумаги или текстиля, пропитанных лаками на основе бакелитовых смол.

Первые называются гетинаксами (ГОСТ 2718-66), вторые — текстолитами (ГОСТ 2910-54). Листы гетинакса и текстолита изготавливаются толщиной от 0,5 до 50 мм. Текстолит лучше подвергается штамповке, но его электрические свойства ниже, кроме того, он значитель-

но дороже. Обычно применяют гетинакс следующих марок: В — для работы в масле и на воздухе, повышенной механической прочности; Г — для работы на воздухе в условиях повышенной влажности; ВС — для работы на воздухе, с повышенными электрическими свойствами.

Из текстолитов применяются следующие марки: А — для работы в масле и на воздухе; Б — для работы на воздухе, повышенной механической прочности; Г — панельный.

Кроме этих марок гетинакса и текстолита, изготавливаются другие марки для работы в масле и для устройств высокой частоты.

При специальных требованиях к трансформатору следует выбирать соответствующую марку. Для бытовых трансформаторов применяют любую марку гетинакса или текстолита.

Объемное сопротивление различных марок гетинакса $\rho_r = 10^9 - 10^{12} \text{ ом} \cdot \text{см}$, текстолита $\rho_v = 10^9 - 10^{10} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

Гетинаксы и текстолиты предназначены работать при температуре окружающей среды от минус 60 до плюс 70° С. Допустимая рабочая температура гетинакса 120° С, выдерживает температуру 140° С, при 150° С может отслаиваться. Для гетинакса марки ВЧ и большинства марок текстолита рабочая температура 105° С. Влагопоглощаемость гетинаксов и текстолитов менее 0,5%. Следует иметь в виду, что ГОСТ указывает влагопоглощаемость по количеству впитанной воды (за 24 ч) в граммах к площади 1 дм^2 , а не в процентах к весу материала.

Стеклотекстолиты выпускаются электротехнических марок СТ, СТУ, СТК, СТЭФ, СТЭП и конструкционный нескольких марок. По электрическим свойствам лучшими марками являются СТК и СТ/ЭП. Стеклотекстолиты отличаются высокой механической прочностью и низкой гигроскопичностью.

Сопротивление стеклотекстолитов марок СТК и СТ/ЭП составляет $\rho_v = 10^{14} \text{ ом} \cdot \text{см}$, $\rho_s = 10^{14} \text{ ом}$. Объемное сопротивление остальных марок $\rho_r = 10^{12} \text{ ом} \cdot \text{см}$. Допустимая рабочая температура 180° С. Кратковременно выдерживают до 250° С.

По назначению электролаки различают: пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки служат для пропитки обмоток и заполнения пор в обмотке как в волокнистой изоляции проводов, так и воздушных межвитковых и межслойных

пор. Это способствует снижению гигроскопичности, увеличивает теплопроводность и электрическую прочность, при этом снижается старение материалов, следовательно, повышается долговечность и надежность обмотки.

Покровные лаки, создавая на обмотке гладкую и глянцевою поверхность, улучшают циркуляцию воздуха и конвекцию тепла обмотки в окружающую среду, дополнительно повышают влаго- и химозащиту, повышают механическую прочность обмотки и улучшают внешний вид.

Клеящие лаки служат для склеивания различных материалов. Они должны иметь высокие электроизоляционные свойства при высокой клеящей способности.

При пропитке должны заполняться все поры в обмотке, для чего пропиточные материалы должны иметь малую вязкость. В оставшихся порах ионизация воздуха (о чем говорилось выше) вызывает местное старение изоляции и снижение электрической прочности. Для трансформаторов малой мощности с относительно малыми напряжениями (за редкими исключениями) это не представляет опасения, что значительно облегчает пропитку таких обмоток. При этом может быть лишь незначительное снижение теплопроводности.

Пропиточные материалы делятся на две группы:

1) компаунды, к которым относятся битумы, битумно-масляные лаки, воскообразные материалы, а также синтетические лаки без растворителей. Компаунды при пропитке находятся в жидком состоянии и застывают при охлаждении (термопластичные) или в результате происходящих в них при нагреве химических изменений (термореактивные), при этом переходят в неплавкое и нерастворимое состояние (полимеризуются). Большинство компаундов имеет большую вязкость. Поэтому пропитка ведется под вакуумом, с последующим повышенным давлением. Этот процесс может выполняться только в заводских условиях;

2) электролаки с растворителями в условиях мелких производств (и в любительских условиях) нашли более широкое применение. Эти лаки состоят из основы (пленкообразующие или нелетучие) и растворителя (летучие). Количество летучих составляет 40—60%. При заполнении пор и испарении летучих основа лака заполняет поры не полностью. Пропитку приходится повторять несколько раз, при этом каждая последующая становится

более покровной, чем пропитывающей. При первых пропитках теплопроводность обмотки повышается, при последующих несколько снижается за счет увеличения толщины слоя лака на поверхности обмотки.

Для пропиток можно рекомендовать лак 321т (ВТУОАВ 504-015), имеющий температуру сушки 105°C , и лак ПФЛ-8а (ТУ ОАВ 504-022) с температурой сушки 125°C . Оба лака водоэмульсионные, предназначены для обмоток по нагревостойкости классов А, Е, В для нормального, усиленно влагостойкого и тропического выполнения. Эти лаки рекомендуются для пропиток обмоток с эмальизоляцией. Лак МЛ-92 (МГМ-16, ВТУ 13-57) с температурой сушки $120\text{--}130^{\circ}\text{C}$ предназначен для обмоток по нагревостойкости классов А, Е, В, F, не рекомендуется для проводов типа ПЭВ-2, пригоден для эмалевых проводов класса нагревостойкости В, F и может применяться для обмоток химостойкого и тропического выполнения. Лаки К-47 (ТУ МХП 658-55) и К-57 (ТУ ВЭИ 25-57) терморезистивные, имеют температуру сушки ступенчатую: $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$, затем $160\text{--}200^{\circ}\text{C}$; по нагревостойкости — класс II.

До пропитки следует производить сушку обмоток, выполненных из хлопчатобумажной изоляции, при температуре $100\text{--}105^{\circ}\text{C}$ в продолжение 1 ч. При водоэмульсионных лаках предварительная сушка не требуется.

Для пропитки обмотка, нагретая до $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$, погружается в лак на 10—15 мин (при хлопчатобумажной изоляции до 20—30 мин).

Сушка обмоток производится в сушильных шкафах конвекционным способом обдувкой горячим воздухом. Применяют также сушку инфракрасным излучением лампами марок ЭС-1А, ЭС-2А (старая марка СК-1), ЭС-1, ЭС-2, ЭС-3 (старая марка СК-2). Лампы марки СК-2 — зеркальные с посеребренной колбой. Мощность ламп ЭС-1А и ЭС-2 250 вт, остальные лампы имеют мощность 500 вт, напряжение 127 в.

При конвекционном способе сушки испарение летучих начинается с поверхности. При этом создается пленка, препятствующая выходу летучих из глубин обмотки. При инфракрасной сушке прогревается вся обмотка и испарение летучих происходит по всей толще обмотки. При этом значительно сокращается время и повышается качество сушки. Этот способ сушки в мелкосерийном производстве является наиболее простым и экономичным.

Следует остановиться на пропитке обмоток по методу Зондероля, который начинает применяться в ряде зарубежных стран. По этому методу обмотка нагревается на 10°C выше температуры кипения растворителя и погружается в лак. При проникновении лака в поры растворитель улетучивается. При этом повышается заполнение пор основой лака, и после пропитки обмотка почти не содержит летучих. Значительно ускоряется последующая сушка обмотки. Согласно испытаниям, проведенным в Чехословакии [Л. 2], время сушки после пропитки (для крупных машин) сокращается с 10—15 ч до 1—2 ч, при этом обмотки более долговечны, чем пропитанные погружением. Эмальизоляция должна быть стойка к действию растворителей и к тепловому удару, и, кроме, того, должна быть значительная разница между температурами кипения и самовоспламенения растворителя.

В табл. 14 приведены данные некоторых наиболее часто применяемых у нас растворителей. (Следует указать, что для одинаковых марок лака иногда применяются различные растворители, вид растворителя указывается в паспорте лака).

Таблица 14

Растворитель	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	Температура самовоспламенения, $^{\circ}\text{C}$	ГОСТ
Ацетон	56	630	2603-63
Бензол	80	580	5955-51
Бензин	80—120	230—260	443-56
Дихлорэтан	83	413	5840-51
Керосин	180—315	300	4753-49
Ксилол	136,5—141,5	500	9949-62
Скипидар	150—180	252	1571-66
Сольвент 1-й сорт	120—160	—	1928-50
То же, 2-й сорт	188—250	—	1928-50
Уайт-спирит	165—200	—	3134-52
Метиловый спирт	65	475	2222-65
Бутиловый спирт	116	366	5208-50
Этиловый спирт	78	404	5962-51

Для обмоток трансформаторов обычно достаточно одной пропитки. Вторую пропитку можно выполнять как покрывную тем же лаком. Для взгостойких и химостойких выполнений следует дополнительно применять покрывные эмали. Эмаль ГФ-92ГС (СПД) ГОСТ 9151-59 имеет температуру сушки $105\text{—}110^{\circ}\text{C}$, рекомендуется для

тропического выполнения, может быть использована для химостойкого по классу В (и ниже).

К клеящим лакам относятся: карбонильный клей БФ (различных марок от БФ-2 до БФ-6), а также некоторые лаки. Высокой клеящей способностью обладают глифталевые лаки. Бакелитовый лак рекомендуется для склейки и пропитки каркасов из гетинакса и текстолита. После склейки каркас следует прогреть при температуре от 120 до 135°С для полимеризации лака (время полимеризации снижается с повышением температуры). Этот лак применяется также как пропиточный. Основное его назначение — покрытие пластин стали. Последнее рекомендуется выполнять распылением с повышенным количеством летучих, при этом лак проникает в поры окалины, хорошо охватывается с металлом и служит как защитой от влаги, так и электроизоляцией от вихревых токов. Покрывать густой лак кистью не рекомендуется, так как этим снижается заполнение стали магнитопровода и плохо заполняются поры в окалине. Для быстрой склейки часто применяют шеллачный лак имеющий очень высокую клеящую способность, но при наличии тонких проводов его применять не следует ввиду его несколько повышенной гигроскопичности и кислотности; кроме того, шеллачный лак дорогой.

Воскообразные материалы, являясь гидрофобными, обеспечивают высокую влагостойкость пропитанных ими изделий и высокие электрические свойства. Влагопоглощаемость этих материалов практически равна нулю. Их недостатком является большая усадка при остывании, приводящая к появлению пузырьков воздуха в пропитываемых изделиях, и невысокая температура плавления. Целесообразно их применение при изготовлении трансформаторов для сырых помещений (насосные, котельные и др.).

Парафин имеет температуру плавления 50—55°С, $\rho_v = 10^{15} - 10^{17}$ ом·см, церезин имеет температуру плавления 57—80°С (в зависимости от марки), $\rho_v = 10^{16}$ ом·см. Церезин дает меньшую усадку, чем парафин, температура его плавления выше, он меньше окисляется при нагреве. Все это обеспечило церезину более широкое применение, несмотря на его более высокую стоимость. Его рекомендуется применять для пропитки обмоток трансформаторов и картонных каркасов. Озеркит имеет температуру плавления 65—84°С, головакс —

93—130° С, по их электрические свойства ниже ($\rho_v = 10^{13}—10^{14}$ ом·см). Их можно применять для проварки картонных каркасов, деревянных крепежных деталей. Часто применяют комбинированные компаунды из указанных материалов, а также с добавлением канифоли и других компонентов.

Воскообразные материалы относятся к небольшому числу компаундов, которые могут быть применены в мелкосерийном производстве.

4. КАРКАСЫ, ОБМОТКИ

Теплопроводность обмоток и охлаждение трансформаторов. Мощность трансформатора повышается с повышением плотности тока. Допустимая плотность тока определяется балансом количества тепла, выделяемого в проводе обмотки (I^2R), и количеством тепла, выделяемого поверхностью обмотки во внешнюю среду, при которой максимальная температура в обмотке не превысит допустимую для изоляции данного провода и применяемых видов изоляции (каркас, прокладки). При этом существенна не средняя температура меди, а температура наиболее нагретой части обмотки. Так как теплопроводность меди бесконечно велика по сравнению с теплопроводностью всех диэлектриков, то теплопроводность обмотки определяется теплопроводностью изоляции провода, прокладок и прослоек воздуха. Поэтому для повышения теплопроводности надо значительно снижать общую суммарную толщину всех видов изоляции, применяя изоляционные материалы с высокой электрической и механической прочностью.

Так, например, обмотка, выполненная проводом ПБД диаметром 1,0 мм с толщиной изоляции 0,22 мм, имеющей коэффициент теплопроводности 0,0007 вт/см·С (см. стр. 41), по сравнению с обмоткой из провода ПЭВ-2 с толщиной изоляции 0,09 мм и коэффициентом

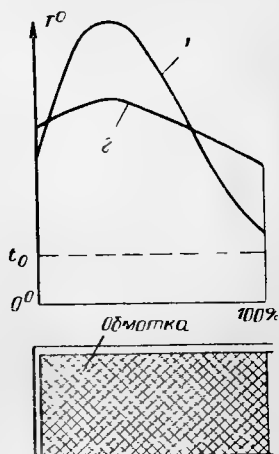


Рис. 14. Распределение температуры нагрева провода по толщине обмотки.

1 — хлопчатобумажная изоляция (непропитанная); 2 — изоляция из эмали; t_0 — температура воздуха.

теплопроводности $0,0018 \text{ вт/см} \cdot ^\circ\text{С}$ будет иметь теплопроводность в 6,3 раза ниже. Следовательно, если при проводе ПЭВ-2 перепад температуры составит $15-16^\circ\text{С}$, то при проводе ПБД (при той же плотности тока) перепад температуры будет близок к 100°С . Снижение плотности тока в 2 раза снизит в 4 раза величину перепада, что соответствует увеличению поверхности охлаждения на 1 *вт* тепла, выделяемого в обмотке, в 4 раза.

На рис. 14 дано сечение однородной обмотки и примерные характеристики обмоток с хлопчатобумажной непропитанной изоляцией и из провода ПЭВ-2. Наличие прокладок в обмотке ухудшает теплопередачу.

Высокая теплопроводность обеспечивает небольшой перепад температуры в толще обмотки. Если перепад составит $30-40^\circ\text{С}$, а наибольшая температура в обмотке будет 105°С , то температура поверхности обмотки составит $65-75^\circ\text{С}$. С повышением перепада температуры между поверхностью обмотки и воздухом повышается конвекция тепла. Если требуемая теплоотдача не будет обеспечена, то повышение теплопроводности лишь снизит максимальную температуру обмотки за счет ее выравнивания, но не даст возможности более полноценного использования меди обмотки и допустимой плотности тока.

При расчете трансформаторов обычно принимают температуру окружающего воздуха не выше 35°С . По местным условиям может быть принята и другая температура. К этой температуре добавляется превышение наружной поверхности обмотки и перепад в толще обмотки. Площадь охлаждения обычно принимается по наружной стороне обмотки (без торцевых сторон). При большой толщине обмотки последние иногда учитываются, но с коэффициентом не более 0,5.

Если раньше, при хлопчатобумажной изоляции, площадь охлаждения иногда превышала 40 см^2 на 1 *вт*, то при современных электроматериалах достаточно легко обеспечить хорошую теплопроводность при 20 и даже 15 см^2 на 1 *вт*. В трансформаторах, работающих в форсированном режиме (с материалами по нагревостойкости класса В), можно снизить площадь охлаждения до 10 и даже 8 см^2 на 1 *вт* (но при высокой теплопроводности и высокой теплоотдаче).

Пропитка обмоток значительно снижает влияние прослоек воздуха на теплопроводность обмоток не только при проводах в хлопчатобумажной изоляции, но и при эмалевых проводах. Так, например, обмотка, выполненная проводом ПЭВ-2 диаметром 0,31 мм, после пропитки

повышает теплопроводность на 45—75% в зависимости от марки лака. Второе значение относится к пропитке лаком на кремнийорганической основе.

При пропитке значительно повышается влаго- и химостойкость, в особенности при применении кремнийорганических лаков. Последние, являясь гидрофобными, придают пропитываемым материалам водоотталкивающие свойства.

Мероприятия по повышению теплопроводности и повышению конвекции тепла в окружающую среду следует проводить на всех трансформаторах независимо от их назначения и требований их надежности (конечно, без ущерба для качества изоляции). Во всех случаях это способствует снижению максимальной температуры и уменьшает старение материалов.

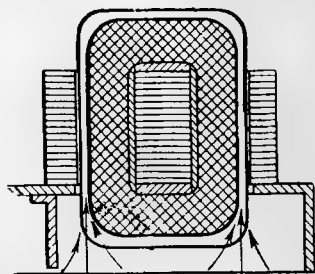


Рис. 15. Трансформатор с повышенной теплоотдачей. Стрелки показывают направление охлаждающего воздуха.

Пропитку обмоток трансформаторов следует применять при их работе в сырых помещениях и в местах с активными газами, при работе в форсированных режимах, а также при предъявлении к ним повышенных требований надежности.

При больших плотностях тока должны быть приняты все меры для повышения конвекции тепла. Часто стремятся полностью использовать окно магнитопровода, кроме того, обмотка покрывается иногда лакотканью, а часто и кабельной бумагой, закрывающей зазоры между обмотками и сталью магнитопровода. Это создает вокруг обмотки тепловой экран, значительно снижающий теплоотдачу. На рис. 15 приведен разрез трансформатора с повышенной теплоотдачей, установленного на шасси. Обмотка выполнена проводом ПЭВ, ПЭТВ (или другим в эмалированной изоляции). Покрываем является слой покровного лака толщиной 0,1 мм (не более 0,15 мм) с глянцевой поверхностью. Между обмоткой и сталью магнитопровода имеется зазор 3—4 мм. При нагреве обмотки в зазоре создается тяга воздуха, тем более интенсивная, чем выше температура обмотки. При качественной штамповке и сборке поверхность

торца магнитопровода в зазоре ровнее, что повышает циркуляцию воздуха. Если в поддоне шасси имеются нагревательные элементы, можно отделить отсеком участок под трансформатором, не закрывая отдельными деталями доступ внешнего воздуха к окнам трансформатора. При установке над трансформатором кенотрона тяга воздуха усилится.

Тепловой режим трансформатора в устройствах необходимо рассматривать с учетом общего количества выделяемого тепла и объема. Это в большой степени относится к испытательным переносным устройствам, где размеры (и вес) часто имеют решающее значение.

Для примера рассмотрим специальный электронный испытательный генератор, разработанный для регулировки реле частоты при выездных работах при требованиях минимального объема и веса, обеспечивающий мощность на выходе более 30 вт при непрерывной работе по 5—6 ч. Трансформатор расположен под высоким шасси, над ним выходной каскад с мощными лампами, отделенный от остальной схемы тепловым экраном. В шасси имеются вентиляционные окна и в кожухе (футляре) против ламп сделан люк, открываемый при работе генератора. При общем количестве тепла (более 100 вт), выделяемого в лампах выходного каскада, размеры устройства составляют примерно 12 дм³.

Вопросы теплоотдачи имеют значение не меньшее, чем теплопроводность, но решаются они различно в каждом конкретном случае.

Каркасы. Обмотки трансформаторов обычно выполняются на каркасах. В заводских условиях для серийных работ их часто выполняют прессованными из пресспорошков. Последние в зависимости от состава могут иметь те или иные электрические, механические и физические свойства. Однако при мелкосерийном производстве каркасы изготовляют наборными из слоистых пластинок, гетинакса, текстолита, в некоторых случаях из картона (применяется картон ЭВ). В основном применяется гетинакс. Картон очень гигроскопичен, без пропитки рекомендован быть не может, но и после пропитки он значительно уступает гетинаксу.

Гетинакс и текстолит хорошо поддаются обработке. Обрезка листов до 2,5 мм может выполняться на гильотинных ножницах. Более толстые листы обрезаются на циркульной пиле. Гетинакс и текстолит малой толщины можно штамповать в холодном состоянии. При толщине 3—4 мм требуется предварительный подогрев до 80—120° С.

На рис. 16 даны образцы заготовок для каркасов. Они либо штампуются, либо вырезаются на малой циркульной пиле с фрезой 80—100 мм, а для окон не более 30—40 мм. В любительских условиях можно их выпи-

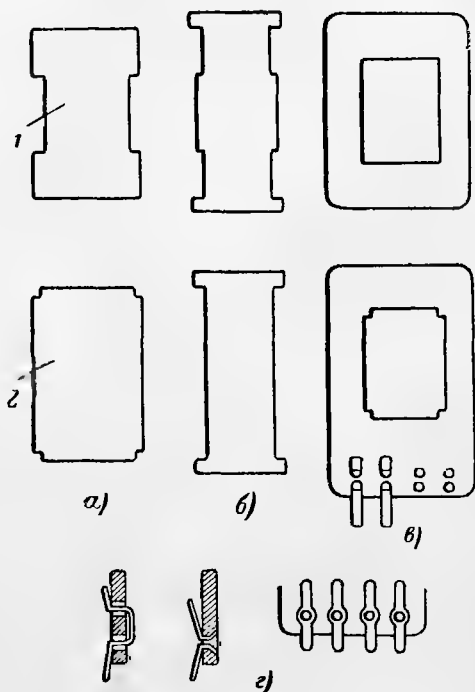


Рис. 16. Заготовки для каркаса.
а, б — детали гильзы; в — щеки; г — различное выполнение выводов; 1 — более жесткий каркас; 2 — упрощенный.

ливать лобзиком с последующей опиловкой надфилем. При том и другом выполнении швы следует проклеить бакелитовым лаком (или клесм БФ-2) и весь каркас покрыть лаком. Это, помимо придания жесткости каркасу, повышает влагозащиту обмотки. Гетинакс в листах для снижения гигроскопичности покрывается тонким слоем лака. При механической обработке в процессе изготовления каркаса этот слой повреждается, кроме того, обнажаются торцы пластин, а вдоль листов гигроскопичность и влагопоглощаемость значительно повышены.

Обычно для гильзы каркаса применяют гетинакс одинаковой толщины. Однако рекомендуется для деталей гильзы, показанной на рис. 16,б, применять гетинакс повышенной толщины. После сборки каркаса ребра гильзы обычно закругляются для уменьшения излома провода на первых слоях. Значительное закругление снижает прочность каркаса. При повышенной толщине этих сторон гильзы можно увеличить закругление (рис. 17).

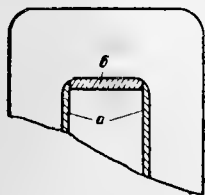


Рис. 17. Закругление углов гильзы.

Испытание прочности эмальсloy провода производится навиванием 10 витков провода на стержень диаметром, равным 4-кратному для проводов до 0,96 мм, 5-кратному для проводов диаметром до 1,56 мм и 6-кратному для проводов диаметром до 2,44 мм. При намотке провода на каркас, помимо изгиба, имеют место сильный натяг и растяжение провода. Учи-

тывая это, указанную кратность надо увеличить в 2—3 раза. Следовательно, для провода диаметром 1 мм следует взять радиус закругления порядка 4—5 мм. Указанные нормы ГОСТ 2773-51 даны для провода ПЭЛУ. Большинство других марок (ПЭВ и др.) более эластичны, но уменьшать радиус не следует. Надо иметь в виду, что при этом обеспечивается более ровная и плотная обмотка как с торцов, так и в окне магнитопровода. При этом допустимо для деталей гильзы, приведенной на рис. 16,а, применить более тонкий гетинакс, повышенная толщина деталей (рис. 16,б) обеспечит достаточную жесткость каркаса. Примерные значения толщины гетинакса даны в табл. 15.

Для трансформаторов мощностью 300—1 000 вт в зависимости от диаметра применяемого провода целесообразно для увеличения радиуса закругления не увеличи-

Таблица 15

Мощность, вт	Размеры, мм, деталей		
	а	б	в
До 10	0,5	0,7—1,5	1,0—1,2
До 100	0,7—1,0	2,0—4,0	1,0—2,0
100—500	1,0—2,0	3,0—6,0	1,5—3,0

вать толщину деталей гильзы, как указано выше, а применять гетинаксовые вкладыши, аналогичные тому, как это выполнялось при намотке витых магнитопроводов (рис. 7), вставляя такие вкладыши в каркас, что обеспечивает по торцевым сторонам гильзы требуемый радиус закругления. Подобные вкладыши целесообразно применять также, когда толщина набора магнитопровода более чем в 2 раза превосходит ширину рабочего стержня.

У каркасов на детали рис. 16,б часто откалываются «усики», крепящие щеки каркаса. Следует эту деталь удлинять, чтобы выступающие части были не менее 2—3 мм (дополнительно увеличивать при пластинах по рис. 5). Внутренний размер гильзы делается шире рабочего стержня магнитопровода на 0,5 мм (и более в зависимости от размеров магнитопровода). По ширине шек и длине каркаса между сталью магнитопровода и каркасом должны быть зазоры не менее 0,5 мм. На пластинах по рис. 4,б длину каркаса значительно укорачивают для возможности сборки магнитопровода.

При изготовлении каркаса должно быть предусмотрено, будет ли он являться отдельным аппаратом или будет монтироваться в комплекте какого-либо устройства. В последнем случае разделка выводов часто выполняется на щеках каркаса (рис. 16). Разделка выполняется обычно на лепестках (называемых «петушками»), при отсутствии таковых их можно выполнить из полосок латуни или белой жести шириной 3,0—3,5 мм. Предварительно следует наметить расположение выводов с учетом последующего монтажа и произвести сверловку. Надо иметь в виду, что в трансформаторах электронной аппаратуры на вторичной обмотке может быть напряжение 700—1 000 в и выше. При запылении поверхности гетинакса и наличии влаги могут быть поверхностные перекрытия, при которых гетинакс склонен образовывать токопроводящие, трудно устранимые дорожки, что следует учитывать увеличением расстояния между соответствующими выводами. Не следует для сверловки отверстий делать разметку острым инструментом (например, штангенциркулем). Получающиеся при этом царапины способствуют образованию токопроводящих дорожек.

При большом числе выводов разделка часто выполняется на планке с петушками, укрепленными на транс-

форматоре. При малом числе иногда выполняют гибкими концами с цветной маркировкой для непосредственного монтажа.

В изделиях ширпотреба часто каркас выполняют из картона ЭВ (ЭВТ), предназначенного для работы на

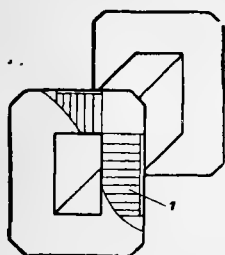


Рис. 18. Картонный каркас.

1 — боковые изгибы гильзы.

воздухе. Выполнить качественный и достаточно жесткий каркас из картона сложнее, чем из гетинакса. Картонный каркас допустимо применять по нагревостойкости в классе У. Он может быть выполнен, как показано на рис. 18. Гильза выполняется из картона толщиной 0,5—1,5 мм, щеки следует делать двойными, внутренние из картона 1—1,5 мм и наружные 0,5 мм. Гильза изгибается и склеивается на болванке. При толщине картона 1 мм и выше боковые изгибы следует над-

резать и часть толщины снимать, склеивать каркас бакелитовым или другим клеящим лаком. После просушки каркас пропитывается церезином, головаксом или пропиточным лаком. Картонный каркас можно допускать только для неответственных изделий.

Иногда бывает целесообразным выполнять каркасы секционированными, как показано на рис. 19. При количестве секций более двух представляет затруднение вывод внутренних концов обмоток от промежуточных секций. Выполнение вывода по внутренней стенке переборки проводом нежелательно, лучше вывод выполнить полоской латунной фольги толщиной 0,15—0,2 мм, сделав предварительно в переборке на небольшую глубину паз по ширине фольги (3—4 мм). Паз следует закрыть тонкой лакотканью на бакелитовом лаке или переборку склеить из двух пластин тонкого гетинакса с полоской фольги между ними (или двумя — для вывода на обе стороны переборки).

Стоимость секционированных каркасов выше, они требуют более качественного выполнения и отпадает возможность применения прессованных каркасов. Поэтому их применение в ряде случаев не оправдывается. В следующем разделе рассматривается целесообразность их применения в некоторых случаях. Кроме того, рассматриваются бескаркасные и галетные обмотки.

Обмотки. Мастерские, производящие намоточные работы, имеют в основном станки для рядовой намотки провода. Обычно нижним пределом рядовой намотки является диаметр 0,15—0,1 мм. Верхний предел — 0,8—1,0 мм. Для проводов большего диаметра применяют более мощные и тихоходные станки. Иногда станки применяют с реверсом, т. е. с автоматическим переключением на обратный ход намотки провода. Но при мелкосерийном производстве и при частой смене размеров обмоток более целесообразен автоматический останов станка для просмотра слоя и, если требуется, для его выправки и укладки межслойной изоляции, а реверс следует выполнять от руки.

Станок должен быть снабжен счетчиком числа оборотов, падсжно связанным с ведущим валиком (не рекомендуется применяемая иногда связь ремешком, где возможно проворачивание, проскальзывание). Часто в схемах телеизмерений, защитной автоматики требуются высокая точность и идентичность трансформаторов.

От качества изготовления каркаса и его крепления на валике намоточного станка зависит качество обмотки. Обычно для крепления каркаса изготавливают болванку из плотного дерева по размеру окна каркаса. Но выполнить болванку достаточно высокого качества и отцентровать ее трудно. Значительно проще изготовить болванку наборной, к тому же она будет пригодна для каркаса при любой толщине пакета магнитопровода. Из листового гетинакса различной толщины (от 10—15 мм до 0,5 мм) нарезаются на циркульной пиле полосы по ширине окна каркаса и по длине, равной длине гильзы каркаса.

Для каждой толщины делают четное число полос. На полосах 10—15 мм на циркульной пиле прорезается паз шириной 3—4 мм и глубиной 0,5 ширины. Сборка болванки выполняется, как показано на рис. 20. Весь набор окончательно уплотняется полосками гетинакса 0,5—1 мм (с обеих сторон). После сборки отвер-

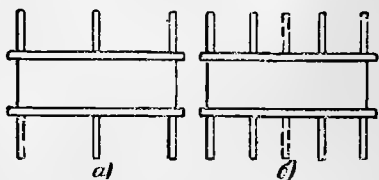


Рис. 19. Секционированные каркасы.

а — двухсекционный; *б* — трехсекционный; пунктиром дана дополнительная переборка.

стие рассверливают до требуемого диаметра (в несколько приемов, начиная с малых диаметров сверл). После намотки каркаса болванка легко выталкивается по частям.

Наиболее часто применяются сплошные намотки, так называемые цилиндрические (без секционирования). Они дешевле и проще в изготовлении. Их недостаток — значительные напряжения между начальными витками

слоя и последними витками последующего слоя. Поэтому приходится применять межслойные прокладки. Часто для этого применяют кабельную бумагу, которая обеспечивает хорошее выполнение рядов, провод, не прогибая бумаги, укладывается шахматным порядком. При этом легче устраняются западания последних витков слоя в нижние слои, особенно вероятные при некачественном выполнении каркаса и тонком проводе. Но при таких прокладках значительно сни-

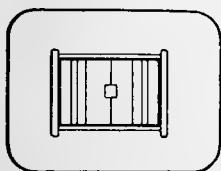


Рис. 20. Наборная болванка для крепления каркаса на шпинделе намоточного станка.

жаются заполнение каркаса медью и теплопроводность обмотки.

Применяют в качестве прокладок тонкую бумагу (например, от разобранных конденсаторов) или полосу тонкой лакоткани, оторванную по ширине каркаса. В начале намотки слоя провод, следуя за неровностями предыдущего слоя, прожимает прокладку и смещает ее против направления намотки, переходя с шахматной укладки провода к сотовой. При этом повышается площадь соприкосновения витков с витками предыдущего слоя и уменьшаются воздушные прослойки между витками, что повышает теплопроводность обмотки. Но за счет смещения изоляции в конце слоя, где наибольшее межслойное напряжение, нижняя обмотка обнажается, и ее изоляцию приходится дополнять (возможно западание витков).

Изоляция слоев кабельной бумагой по указанным выше причинам не может быть рекомендована. Более целесообразно изоляцию слоев выполнять полоской тонкой лакоткани, отрезанной по диагонали (на $35-45^\circ$) для более плотного облегающего обмотки. Полоска накладывается спирально с некоторым напуском, при этом не от начала намотки слоя, а отступя на 30—50% ши-

рины слоя (в зависимости от межслойного напряжения). Последний оборот должен несколько находить на противоположную щеку каркаса (рис. 21), к которой подклеивается густым бакелитовым (или другим) лаком. Следует иметь в виду, что лакоткань, отрезанная по диагонали, легко вытягивается, при этом повреждается ее лаковый слой. Поэтому при покрытии обмотки такой полоской натяг надо давать слабый, лакоткань окончательно прижимается проводом. Аналогично покрывается обмотка и полосой бумаги. Если обмотка в дальнейшем не будет пропитываться или же будет пропитываться церезином или другим воскообразным диэлектриком, можно применять бумагу от разобранных конденсаторов. При других видах пропитки лучше применять пропиточную или намоточную бумагу.

Аналогично можно выполнять и межобмоточные прокладки, но они, конечно, должны перекрывать всю ширину обмотки от одной щеки до другой и в зависимости от междуобмоточного напряжения могут выполняться более толстой лакотканью или лучше двойным слоем тонкой лакоткани.

При отсутствии лакоткани может быть применена шелковая ткань, также отрезанная по диагонали. Она обеспечит хороший напуск на щеки каркаса. Ткань необходимо покрыть лаком или другой пропиткой. Той же пропиткой ткань подклеивается к щекам каркаса. Ткань следует брать светлую неокрашенную, так как в краске могут быть нежелательные примеси.

Применение сплошной намотки (без секционирования) приводит к необходимости увеличения межслойных и межобмоточных прокладок. Это снижает коэффициент заполнения медью каркаса обмотки. При этом снижается теплопроводность обмотки и ее надежность за счет повышенного межслойного напряжения. Применение секционирования также снижает коэффициент заполнения окна каркаса, но при отказе от межслойной изоляции значительно повышается теплопроводность обмотки. Кроме того, при повреждении любой обмотки необходима перемотка только одной секции.

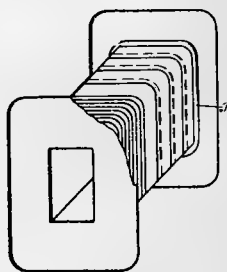


Рис. 21. Покрытие слоев обмотки леп-
той.

1 — напуск ленты на щеку каркаса.

Применение двухсекционных каркасов целесообразно в двухтактных схемах (усилители с двухтактным трансформаторным выходом), в силовых трансформаторах при большой длине окна магнитопровода, для снижения межслойного напряжения и полного или частичного отказа от межслойных прокладок. Но первичная и вторичная обмотки должны распределяться в

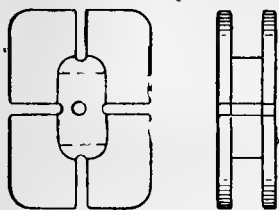


Рис. 22. Шаблон для галетной обмотки. Пунктир показывает размер стержня магнитопровода (передняя щека шаблона снята).

обеих секциях. Разнос их в разных секциях приведет к увеличению потоков рассеяния, особенно значительных при магнитопроводе со стыками. При двухсекционном каркасе, как и при сплошной намотке, неизбежны межобмоточные прокладки. Уменьшение их толщины увеличивает токи утечки (и емкостные токи) между обмотками. При увеличении толщины прокладок снижается теплопроводность обмоток. При трехсекционном каркасе и при двухобмоточном транс-

форматоре при расположении первичной обмотки в крайних секциях, а вторичной в средней повышаются теплопроводности и снижаются токи утечки выполняются независимо. При этом можно значительно повысить надежность обмотки. Может быть добавлена переборка (указанная пунктиром на рис. 19,б).

Каркас с большим количеством секций может применяться для трансформатора на повышенных напряжениях. Для обмоток на высокие напряжения бывает целесообразным применять провод марки ПЭЛШО и пропитывать его церезином, поскольку для подобных трансформаторов применяют обычно облегченные режимы.

Пропитка секционированных обмоток терморезистивными лаками для использования в форсированных режимах снижает возможность их частичного ремонта. Поэтому в ряде случаев предпочтительно применять галетные обмотки. Вместо каркаса изготавливается только гильза. Обмотки мотаются на шаблонах (рис. 22). Щеки шаблона изготавливаются из гетинакса или латуни толщиной 2—3 мм, болванка шаблона делается по толщине галеты. Шаблон следует (в зависимости от размеров) стянуть двумя или четырьмя винтами. Ширина

болванки несколько больше ширины гильзы (учитывая оплетку лентой). Верх и низ (расположение по рисунку) делаются либо по полуокружности, либо по полуовалу. При этом повышается плотность намотки и при оплетке лентой снижаются утолщения ленты по внутренним углам галет. Получаемые «окна» между гильзой и обмоткой могут быть использованы для прохода внутренних выводов обмоток.

Прорези в шаблоне предназначены для увязки обмотки и предохранения от распускания до ее оплетки лентой. Но при этом их плотность несколько нарушается. Более целесообразно пропитывать галеты непосредственно при намотке. Для их пропитки проще применять лаки холодной сушки или термореактивные с невысокой температурой полимеризации. Во избежание прилипания галеты к щекам шаблона последние покрываются алюминиевой фольгой. Если применяемый лак имеет свойство схватываемости с фольгой, можно применять прокладки от старых конденсаторов, взятые в несколько слоев.

Количество шаблонов следует делать по числу галет. Они могут быть надеты на валик намоточного станка полным комплектом, что ускорит изготовление галет и их сушку. Между шаблонами прокладываются гетинаксовые (или металлические шайбы) толщиной 2—3 мм. После просушки галеты оплетаются полоской лакоткани, отрезанной по диагонали. Натяг по углам увеличивают, по наружной стороне перекрывать не обязательно, можно даже оставить просветы, иначе может иметь место значительное утолщение лакоткани по внутреннему углу. Снаружи галеты покрываются лаком. По наружному выводу должно быть видно направление обмотки во избежание неправильной сборки комплекта. Стяжка галет может быть выполнена планками из гетинакса, заклинивающими всю сборку по длине в окне магнитопровода, либо невысокими щеками, надетыми с обеих сторон гильзы.

Помимо галетной намотки, применяется и другой вид бескаркасной намотки. Как и при галетной намотке, требуется только одна гильза. На рис. 23 дано сечение такой обмотки, выполненной с прокладками в каждом слое. Такую обмотку можно выполнить при толщине слоя 15—20 мм. Значительно прочнее будет такая обмотка при покрытии каждого слоя лаком. При проводе

0,4 - 0,5 мм и выше при закреплении лаком витков первого ряда или хотя бы крайних витков можно выполнить обмотку (при сотовой укладке провода) без прокладок, если, конечно, позволит значение межслойного напряжения.

Выполнение галетных и бескаркасных обмоток целесообразно для нагрузочных и аналогичных трансформаторов. Бескаркасные обмотки можно выполнять с шах-

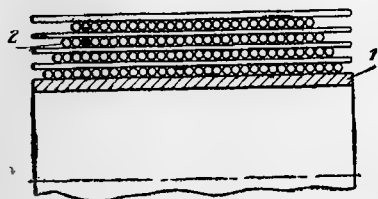


Рис. 23. Бескаркасная намотка обмотки.

1 — гильза; 2 — обмотки.

матной укладкой провода (с одинаковым числом витков в слое), для чего каждый слой переплетается лентой. При прямоугольном сечении провода намотка упрощается и повышается заполнение медью и теплопроводность обмотки. Провод следует применять в стекловолоконистой изоляции, для стяжки применять ленты из

стекловолокна. Поскольку стеклолента растягивается слабо, при оплетке галетных обмоток следует применять более упкую ленту.

Обмотки пропитываются кремнийорганическими лаками и запекаются при температуре 180—200° С.

Гильзы изготавливаются из стеклотекстолита, который режется фрезой на фрезерном станке.

В некоторых случаях только изменением расположения отдельных обмоток можно повысить теплопроводность всей обмотки. Так, например, при наличии на трансформаторе лабораторного осциллографа двух обмоток накала (электронных ламп и осциллографной трубки), каждая обмотка обычно выполняется по всей длине каркаса, что приводит к необходимости выполнять две межобмоточные прокладки на повышенные напряжения. При ремонте трансформатора обмотки можно выполнить, как указано на рис. 24; каждая обмотка располагается в два (или три) слоя без промежуточных прокладок. Отпадает одна межслойная прокладка на повышенное напряжение. При внешней отделке покровным лаком расстояние между обмотками достаточно 2—3 мм.

В различных схемах автоматики многие трансформаторы непрерывно находятся под напряжением и мо-

гут при этом находиться в условиях повышенной влажности. В ряде случаев к ним предъявляются требования повышенной надежности. Однако некоторые дефекты провода, которые в большинстве случаев не существенны, в подобных условиях недопустимы. Согласно ГОСТ эмалированный провод может иметь точечные повреждения. Провод ПЭЛ на длине 15 м при диаметре провода 0,14 мм и меньше может иметь число точечных повреждений до 15, при диаметрах до 0,35 мм — до 10. Длина провода в двух слоях может превышать 15 м. Следовательно, в том или другом месте обмотки точечные повреждения могут быть в какой-то близости, и влага, проникающая в обмотку и покрывающая провод и изоляционные прокладки, может образовывать «мостики» между отдельными проколами, по которым будет непрерывно проходить ток утечки. Последний вызывает ускоренное старение изоляции. Полная пропитка обмоток способствует заплыванию этих повреждений, частично изолирует оставшиеся повреждения.

Для провода ПЭВ-1 допустимо не более семи точечных повреждений на 15 м провода, для ПЭВ-2 — не более пяти, но часто их бывает не более двух-трех¹.

Выводы обмоток при диаметре провода 0,5—0,7 мм и выше обычно выполняются своим проводом. При разделке на лепестках, находящихся на щеках каркаса, обмотку часто выводят своим проводом при диаметре 0,2 и даже 0,15 мм. Но выводы тонким проводом следует выполнять с большой слабиной и по щеке каркаса проклеивать клеем БФ, бакелитовым или другим лаком для предохранения от обрыва в месте выхода провода из отверстия в щеке каркаса.

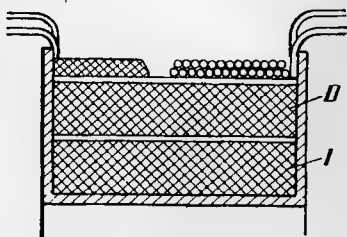


Рис. 24. Разнос обмоток накала на разные участки длины обмотки.

I — первичная обмотка; *II* — вторичная, по верху две обмотки (например, накал лампы и осциллографической трубки).

¹ Раньше выпускался провод ПЭЛ-2. Цифра 2 означает не двойную пропитку, как часто ошибочно считают, а пониженную кондицию, допускающую 25 и 20 проколов. Для ответственной аппаратуры применение ПЭЛ-2 недопустимо.

При выводе обмотки полоской фольги на нее наматываются 5—6 оборотов обмоточного провода. Первые 2—3 оборота имеют незачищенную изоляцию. Обязательно следует давать слабину провода (рис. 25,а). Аналогично выполняется вывод гибким проводом (рис. 25,б). Выполнять пайку с натягом недопустимо¹.

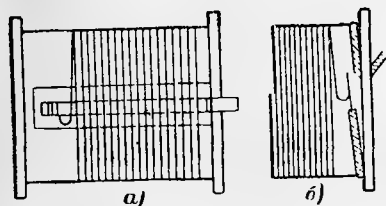


Рис. 25. Выполнение выводов
а — полоской фольги; б — гибким проводом.

Пайка производится сканифолью (раствор в спирте или скипидаре), паяльные мази применять нельзя. Гибкий провод плотно увязывается ниткой. Место пайки закрывается сложенной вдвое полоской лакоткани. Так же в сложенную вдвое лакоткань закладывается полоска фольги перед намоткой последнего слоя провода обмотки. При всех вариантах спайки тонких проводов между собой и с выводами участок провода, подвергшийся зачистке, не должен испытывать механических нагрузок (натяг провода). Оголенные места провода рекомендуется покрывать каким-либо лаком для предохранения от возможной коррозии (шеллак при тонких проводах применять не следует).

5. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

Исходные условия расчета. По первоначальному «упрощенному» методу расчета последний начинается с определения сечения стали магнитопровода из выражения

$$S_c = K\sqrt{P}, \quad (6)$$

где P — мощность трансформатора.

При этом принимают коэффициент $K=1\div 1,5$; 1 — для лучших сталей; 1,5 — для худших. При последую-

¹ В схемах защиты и автоматики на обмотках, находящихся непрерывно под напряжением, были случаи обрыва провода даже при диаметре до 0,15 мм с пайками, выполненными с натягом. В месте пайки провод, несколько ослабленный зачисткой и коррозией, за счет расширения обмотки при нагреве надламывался и расходился. При охлаждении обмотки контакт восстанавливался.

щем расчете определяют необходимый размер окна (размер пластин стали).

Однако ввиду наличия очень большого количества марок стали с различными параметрами и влияния конфигурации пластин стали на параметры трансформатора можно при таком расчете либо нецелесообразно использовать сталь, либо получить недопустимо большой ток намагничивания и большие потери в стали.

Выражение (6) может служить для предварительного определения сечения стали. Но при этом значение коэффициента K будет определяться не столько качеством стали, сколько техническими требованиями на трансформатор. В тех случаях, когда потери в стали не имеют значения, коэффициент K может быть целесообразным значительно повысить (сверх 1,5) даже при применении качественных сталей (что обосновано в дальнейшем). Выбрав ориентировочно сечение стали, производят расчет в соответствии с выражением (5).

ГОСТ даст характеристики стали с учетом наибольших минусовых отклонений, кроме того, в ГОСТ приводятся коммутационные кривые намагничивания (т.е. снимаемые при помощи переключения направления постоянного тока), которые идут ниже. Производства, изготавливающие небольшие трансформаторы, применяют для своих изделий с учетом применяемых ими конфигураций магнитопроводов усредненные характеристики, идущие выше даваемых по ГОСТ (иногда до 20%).

Из выражений (2) и (3) с учетом k_c [см. вывод выражения (5)] можно получить:

$$B = \frac{50}{S_c w} E; \quad (7)$$

$$B = \frac{50}{S_c \frac{w}{\delta}}; \quad (7a)$$

$$S_c \frac{w}{\delta} = \frac{50}{B}; \quad (8)$$

$$\frac{w}{\delta} = \frac{50}{S_c B}. \quad (8a)$$

Для полноценного расчета необходимо иметь или снять характеристики намагничивания магнитопровода,

предназначенного для изготавливаемого трансформатора. Для этого на магнитопровод накладывается опытная обмотка с произвольным числом витков и диаметром провода. Для удобства последующих расчетов число витков рекомендуется взять так, чтобы произведение ωS_c было кратным 50. Снятие характеристики намагничивания производится по схеме рис. 26, а с питанием

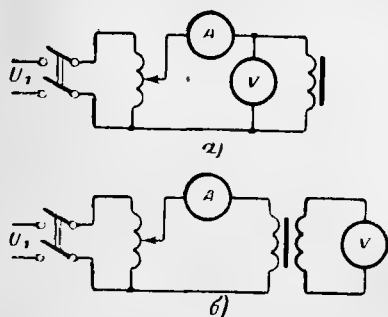


Рис. 26. Снятие характеристики намагничивания магнитопровода. а — при одной обмотке; б — при двух обмотках.

схемы от автотрансформатора (например, ЛАТР-1) для обеспечения подачи синусоидального напряжения. Повышают напряжение и при этом замеряют ток. Согласно выражению (7) определяется значение индукции. Произведение тока намагничивания на число витков дает м. д. с. магнитопровода, что достаточно для расчета. Для сравнения с заводскими параметрами

стали или другими магнитопроводами следует м. д. с. разделить на среднюю длину магнитной линии магнитопровода. На местах стыков и отверстий напряженность будет повышенная. Испытание стали можно проводить на пакете магнитопровода любой толщины, так как напряженность не зависит от толщины набора.

В тех случаях, когда имеют дело с различными трансформаторами, можно рекомендовать изготовить «эталонные» обмотки (на каркасах) на те размеры пластин, которые применяются на данном производстве, например, Ш-20, Ш-25 и др. Длину каркаса и размер щек взять по наименьшим значениям каждого штампа. Толщина набора безразлична (10—15 мм). Число витков для удобства расчетов следует округлять, например 1000 (или 500) витков. При 1000 витках миллиамперметр дает показания непосредственно в амперах. Для замера напряжения лучше наматывать отдельную обмотку проводом любого сечения (рис. 26, б). При этом вольтметр будет замерять э. д. с. (без падения напряжения от тока намагничивания в первичной обмотке). Рекомендуется, как и выше, принять такое

число витков, при котором их произведение на сечение стали было кратным 50, например при размере окна каркаса $20 \times 10 \text{ мм}^2$ (2 см^2) надо намотать 2500 (или 1250) витков. При этом индукции 1 тл будет соответствовать напряженье 100 в (или 50 в).

Полученная вольт-амперная характеристика является основной для расчета трансформатора. По ней выбирается индукция, определяется величина тока намагничивания. Обычно она снимается не ниже 0,5–0,7 тл.

Надо иметь в виду, что потребление вольтметра должно быть очень мало, что существенно при испытаниях стали с очень малыми потерями, особенно на малых напряжениях. При отсоединении вольтметра во время замера показания амперметра не должны снижаться. В случае снижения тока следует применять только схему, приведенную на рис. 26,а, включая вольтметр до амперметра. Но при этом замер напряжения будет завышен на величину падения напряжения на амперметре.

Для расчета трансформатора должна быть задана мощность вторичной обмотки. При изготовлении трансформаторов для различных электронных и других устройств, где может быть несколько вторичных обмоток, требуется подсчитать их на суммарную мощность. При расчете мощности первичной обмотки должен учитываться к. п. д. трансформатора.

Выбор сечения стали сердечника и рабочей индукции должен производиться с учетом режима работы трансформатора. При этом могут быть полезными данные некоторыми авторами расчетные рекомендации, приведенные в табл. 16.

При расчете основных размеров трансформатора важно правильно учесть коэффициент заполнения окна

Таблица 16

Мощность трансформатора, Вт	B , тл	К. п. д.	Плотность тока, а/мм ²
До 20	0,5–0,75	0,6–0,75	2,5–4,5
20–50	0,7–0,9	0,75–0,85	2,5–3,5
50–100	0,9–1,0	0,8–0,9	2,0–3,0
100–300	1,0–1,3	0,85–0,95	1,2–2,5

Таблица 17

Диаметр провода, мм	Коэффициент заполнения окна	
	ПЭЛ и др.	ПЭЛШО
0,1–0,2	0,1–0,2	До 0,15
0,2–0,4	0,2–0,3	0,15–0,25
0,4–0,8	0,3–0,35	0,25–0,35
0,8–1,5	0,35–0,45	0,3–0,45

магнитопровода медью. Примерные значения этого коэффициента приведены в табл. 17. Этот коэффициент учитывает отношение сечения меди всех обмоток к площади окна, занятого медью, материалом каркаса, прокладками и воздушными прослойками.

Верхние пределы по плотности тока требуют обеспечения хорошей теплопроводности. Но эти значения не являются предельными. В трансформаторах некоторых телевизоров при мощностях 130–180 *вт* применяют плотности тока до 2,7–3 *а/мм²*, в радиоприемниках, где условия охлаждения лучше, при мощностях выше 100 *вт* плотность тока доходит до 3,3–3,5 *а/мм²*. При повышении плотности тока почти пропорционально увеличивается мощность трансформатора, при этом к. п. д. незначительно повышается, если потери в стали больше, чем потери в меди, при обратном отношении несколько снижается. Когда к. п. д. не имеет существенного значения, удельные нагрузки активных материалов (индукция и плотность тока) могут быть приняты в пределах допустимой температуры нагрева трансформатора. Это определит минимально допустимый к. п. д. При применении магнитопроводов с уширенным основанием и ленточных значение индукции может быть принято более высоким: для стали Э-41, Э-42 при мощностях выше 100 *вт* — до 1,3–1,4 *тл*, при мощностях порядка 10 *вт* — 1,0–1,1 *тл*. При требованиях снижения тока намагничивания (и потерь) индукцию следует соответственно снижать. Коэффициент заполнения окна медью в заводских условиях строго фиксирован, а при кустарном производстве может колебаться в зависимости не только от имеющейся технологии, но часто от исполнителя.

Выполнение расчетов. При выборе основных размеров трансформатора обычно проводятся предварительные подсчеты, где сопоставлением нескольких расчетных значений индукции и плотности тока выявляются величины, при которых достигаются желательные соотношения.

Ниже показаны примерные расчеты по выбору основных размеров с учетом различных требований к трансформаторам и возможности их выполнения. Так как предварительные расчеты определяют лишь основные параметры трансформатора, во всех примерах расчет ведется по первичной обмотке. Вторичные об-

мотки учитываются при этом только коэффициентом заполнения окна магнитопровода.

Пример 1. Рассчитать трансформатор мощностью (вторичной) 130 *вт*, включенный всегда с номинальной нагрузкой (для испытательной лабораторной аппаратуры) на напряжения сети 110, 127, 220 *в*. Примем к. п. д. трансформатора 0,9. Первичная мощность

$$P_1 = \frac{130}{0,9} = 144 \text{ вт.}$$

Сечение стали

$$S_c = K\sqrt{144} = K \cdot 12 \text{ см}^2.$$

Приняв $K=1$, возьмем сечение стали Ш-25×50 $\text{мм}^2=12,5 \text{ см}^2$ [выражение (6)]. Сталь Э41, магнитопровод со стыками. Условно допустим, что снятая на данном магнитопроводе характеристика соответствует пунктирной линии кривой 2 (рис. 3)¹. Первичная обмотка с переключением с параллельного на последовательное соединение. Учитывая рекомендации для предварительных подсчетов в табл. 6, примем индукцию 1,2 *тл*. Согласно выражению (8а) число витков на 1 *в* составит 3,33. Для компенсации падения напряжения от тока нагрузки в первичной обмотке уменьшаем число витков на 3%, во вторичной увеличиваем на 3% (после окончательного расчета этот процент уточняем). Получаем первичные витки соответственно 355, 410 и на 220 *в* — $355 \times 2 = 710$. Номинальный первичный ток (при 220 *в*)

$$I = \frac{144}{220} = 0,66 \text{ а.}$$

Допустим плотность тока 2,5 *а/мм*². Ближайший больший диаметр провода 0,59 *мм*, при этом плотность тока 2,41 *а/мм*², принимаем марку провода ПЭВ-2. Коэффициент заполнения окна медью для первичной обмотки принимаем $k_m = 0,3 \div 0,32$, для вторичной (более тонкий провод и дополнительно прокладки между вторичными обмотками) 0,23—0,25. Среднее значение $k_m = 0,27$. В соответствии с выражением (5) окно магнитопровода принимаем 25×60 мм^2 . Длина магнитной линии 20 *см*.

Выше было сказано, что расчет трансформатора производится по полной м. д. с. (*ав*), снятой на магнитопроводе.

Для приведения кривой 2 рис. 3 к условной снятой характеристике надо значения 2,5; 5; 7,5 ... *ав/см* на оси абсцисс умножить на 20 *см*. При этом получим значения м. д. с.: 50, 100, 150 ... *ав*, и значению индукции 1,2 *тл* будет соответствовать 80 *ав*.

Отсюда при $w=710$ $I_{\text{ном}} = \frac{80}{710} = 0,07 \text{ а}$. По отношению к полному току

$$I_{\text{ном}} = \frac{0,07 \cdot 100}{0,66} = 17\%.$$

¹ Кривая 2 снята на магнитопроводе с длиной магнитной линии 45 *см*, но для рассмотрения порядка расчетов это не существенно.

Объем стали магнитопровода составляет $20 \text{ см} \times 12,5 \text{ см}^2 = 250 \text{ см}^3$, удельный вес 7,75, вес магнитопровода 1,9 кг. Удельные потери (на 1 кг) стали Э41 составляют при индукции 1,0 тл 1,35 вт (см. табл. 2). При индукции 1,2 тл — 1,95 вт (потери пропорциональны квадрату индукции). Учитывая, что магнитопровод имеет стыки, где индукция повышена, увеличим потери на 20%. Итого потери в стали магнитопровода составят $1,95 \times 1,9 \times 1,2 = 4,5 \text{ вт}$.

Выше падение напряжения в меди обмотки компенсировалось изменением числа витков обмоток. Было принято 3%. В зависимости от плотности тока и других параметров трансформатора этот процент может меняться. Вместо часто применяемого расчега падения напряжения по каждой обмотке рекомендуем корректировку принятого процента выполнить по следующему выражению:

$$u, \% = 0,02 I_0 \frac{w}{b} \Delta, \quad (9)$$

где Δ — плотность тока, а/мм²;

I_0 — средняя длина витка обмотки, см.

Это выражение даст падение напряжения на длине провода $I_0 \frac{w}{b}$ на котором индуцируется напряжение 1 в; так как длина выражена в сантиметрах, то падение напряжения получается в сотых долях вольта, т. е. в процентах.

Коэффициент 0,02 соответствует удельному сопротивлению меди, приведенному к температуре порядка 60° С (57° С). При повышенных температурах коэффициент может быть скорректирован. Сопротивление провода при температуре T равно $R_T = R_{20} [1 + 0,004(T - 20)]$. В табл. 18 приведены изменения сопротивления проводов при нагревании (сопротивление при 20° С принято за единицу).

При принятых параметрах средняя длина витка $I_0 = 22 \text{ см}$, число витков на вольт $\frac{w}{b} = 3,33$, плотность тока $\Delta = 2,4 \text{ а/мм}^2$. Поставив эти данные в выражение (9), получим падение напряжения 3,5%, что

Таблица 18

Температура, °С	$\frac{R_T}{R_{20}}$	Температура, °С	$\frac{R_T}{R_{20}}$	Температура, °С	$\frac{R_T}{R_{20}}$
0	0,920	55	1,140	85	1,260
5	0,940	60	1,160	87,5	1,270
10	0,960	62,5	1,170	90	1,280
15	0,980	65	1,180	92,5	1,290
20	1,000	67,5	1,190	95	1,300
25	1,020	70	1,200	97,5	1,310
30	1,040	72,5	1,210	100	1,320
35	1,060	75	1,220	102,5	1,330
40	1,080	77,5	1,230	105	1,340
45	1,100	80	1,240	107,5	1,350
50	1,120	82,5	1,250	110	1,360

к 220 в составит 7,7 в. Потери в меди (в обеих обмотках) равны $7,7 \times 0,66 \times 2 = 10$ вт, в стали 4,5 вт, всего 14,5 вт, или 10% первичной мощности. К. п. д. трансформатора 0,9. Площадь охлаждения 140 см², на 1 вт потерь в меди приходится 14 см², что допустимо. Производим пересчет числа витков, учитывая падение напряжения 3,5%. Получаем для обмотки 110 в 352 витка, для обмотки 127 в 407 витков.

Задано вторичное напряжение 400 в при токе 230 ма (для мостовой схемы выпрямителя) и напряжение накала 6,3 в при токе 5 а. Для обмотки 400 в берем провод марки ПЭВ-2 диаметром 0,35 мм, что соответствует плотности тока 2,4 а/мм². Число витков обмотки, учитывая падение напряжения 3,5%, составит 1380 витков. Для накала возьмем ближайший больший диаметр провода 1,68 мм. Число витков 22. Длина окна магнитопровода 60 мм, внутренний размер каркаса 55—56 мм. В слое первичной обмотки уложится 82—84 витка, в двух — 165 витков, максимальное межслойное напряжение 50 в, что при проводе ПЭВ-2 допускает намотку без прокладок. Во вторичной обмотке межслойное напряжение дойдет до 80 в (в слое 130 135 витков). Требуются межслойные прокладки на 40—50% ширины обмотки (см. рис. 21). Общая толщина обмотки без учета прокладок составит примерно 13 мм (первичная, 10 слоев — 7 мм, вторичная, 11 слоев — 4,5 мм, накала — 1,7 мм). К этому надо прибавить три межобмоточные прокладки по 0,5—0,7 мм, пять межслойных прокладок (10 полупрокладок) по 0,1—0,15 мм; кроме того, толщину гильзы каркаса и наружный зазор между наружной поверхностью обмотки и магнитопроводом, итого 21—22 мм. Ширина окна 25 мм. Можно применить провод первичной обмотки 0,64 мм и вторичной 0,38 мм. Общая толщина обмотки (без прокладок) увеличится с 13 до 15 15,5 мм. Толщина прокладок та же. Плотность тока снизится до 2 а/мм², снижение витков 3% (остаются первоначальные), потери в меди 8,5 вт. Вторичные витки 1370, накал — 22 витка.

При окончательном расчете всегда может потребоваться та или иная корректировка первоначального расчета. При наличии отштампованных пластин определенной стали корректировка может идти по изменению толщины набора магнитопровода, индукции, плотности тока. В некоторых случаях может быть целесообразным переход на двухсекционные и трехсекционные каркасы, о чем говорилось в разделе «обмотки».

В трансформаторах, применяемых в испытательных электронных устройствах, при уплотненном шасси в ряде случаев применяют магнитопроводы, толщина набора которых значительно превышает ширину рабочего стержня. При горизонтальном расположении магнитопровода это уменьшает занимаемую на шасси площадь. Применяют иногда магнитопроводы с соотношениями Ш-25×75 мм², Ш-30×72 мм². Широко применяются в ряде устройств пластины с уменьшенной шириной окон, например, пластины Ш-30 часто применяются с шириной окон и крайних стержней 19 мм. При этом размер пластины примерно тот же, что у 6—1197

Ш-25 нормального выполнения. Увеличение толщины пакета и ширины стержня увеличивает вес стали и (при той же индукции) потери в стали. Число витков обмоток значительно снижается, упрощается и удешевляется обмотка. Уменьшение толщины обмотки повышает теплопроводность, что допускает повышение плотности тока до 3 а/мм^2 и выше (при мощностях до 150—200 *вт*). Вес трансформатора повышается, но, как сказано выше, снижается занимаемая площадь. В ряде случаев подобные магнитопроводы с уменьшенной шириной окон целесообразно применять в переносных испытательных устройствах. Однако эта конфигурация пластин стали имеет более узкую область применения, чем с нормальной шириной окон.

Пример 2. Рассмотрим возможность расчета трансформатора, аналогичного рассмотренному в первом примере, с тем же размером магнитопровода, теми же обмоточными данными и плотностью тока и определим, какими должны быть потери в стали магнитопровода, чтобы трансформатор удовлетворял следующим техническим условиям: мощность вторичная порядка 130 *вт*, минимальная нагрузка 30% (40 *вт*), начиная от которой трансформатор должен иметь к. п. д. не ниже 0,9. Активные потери в меди при полной нагрузке приняты, как и выше, 9—10 *вт*. Так как потери в меди пропорциональны квадрату тока, то при 40 *вт* они будут менее 1 *вт* (0,8—0,9 *вт*). При к. п. д. 0,9 общие потери должны быть не более 4 *вт*. За вычетом потерь в меди потери в стали должны составить (округленно) 3 *вт*. Пакет магнитопровода весит 1,9 *кг*. Итого допустимые потери на 1 *кг* при индукции 1,2 *тл* составят 1,58 *вт*. В пересчете на 1,0 *тл* составят 1,08 *вт*. Согласно табл. 2 этим потерям соответствует сталь Э43 при толщине листа 0,35 *мм*. При этом надо применять ленточный магнитопровод (или штампованный на пластинах с уширенным основанием). На рис. 3 такому магнитопроводу соответствует кривая 1. При нагрузке 130 *вт* его к. п. д. порядка 0,92, при 80 *вт* — 0,94 и при 40 *вт* — 0,9.

Аналогично рассчитываются трансформаторы, работающие преобладающую часть времени на холостом ходу. Задаются потери в стали (иногда ток холостого хода), определяется возможность обеспечения требуемых потерь подбором марки стали, выбором индукции, конфигурации пластин и соотношением размеров магнитопровода. В ряде случаев при включении нагрузки можно допустить большие потери в меди, т. е. повысить плотность тока. В этом случае недостатком явится значительно спадающая (по напряжению) нагрузочная характеристика, что часто бывает допустимо.

Для оценки снижения потерь в трансформаторе рассмотрим изменение потерь с увеличением окна маг-

питопровода. Объем стали примерно равен произведению длины средней магнитной линии на сечение стали. В приведенных примерах при увеличении ширины окна с 25 до 30 мм площадь окна увеличится на 20%, а длина магнитной линии на 5% (с 20 до 21 см). При снижении на 5% толщины магнитопровода вес стали и потери не изменятся, а произведение $S_0 S_c$ увеличится на 15%, что позволит снизить плотность тока и потери в меди либо снизить индукцию и потери в стали. Но значительное увеличение ширины окна и толщины обмотки приводит к снижению поверхности охлаждения и необходимости снижения плотности тока. Поэтому такое решение целесообразно, если требуется снизить потери как в стали, так и в меди. При этом увеличиваются размеры трансформатора.

В примере 2 приведен расчет трансформатора с пониженными потерями для мощности выше 100 вт. В автоматике, релейной защите часто приходится выполнять трансформаторы на значительно меньшие мощности.

При уменьшении мощности трансформаторов в n раз и пропорциональном уменьшении всех размеров потери в меди и стали снижаются в меньшей степени, потери, отнесенные к мощности, повышаются в $\sqrt[4]{n}$ раз. Но это при сохранении всех компонентов правой части равенства в выражении (5), что обычно невыполнимо.

Однако применением сталей с малыми потерями, как Э43, Э43А и в особенности марок Э310—Э330А, выбором оптимальных значений индукции и соотношением размеров и веса магнитопровода можно в той или иной мере получить достаточно удовлетворительные решения. Для трансформаторов малых размеров применять магнитопроводы, имеющие стыки, не рекомендуется.

До сих пор рассматривались трансформаторы, работающие при номинальном напряжении сети. Однако в схемах релейной защиты и автоматики и в ряде других устройств часто напряжение может изменяться в широких пределах (от номинального до нуля). В таких случаях бывает необходимым обеспечить высокую точность трансформации в широком диапазоне изменения индукции. Величина тока намагничивания определяет погрешность трансформатора (по коэффициенту и уг-

лу). Аналогично приходится трансформировать и токи. К подобным трансформаторам часто предъявляются требования, соответствующие определенному классу точности.

В этих случаях целесообразно применять марки сталей с повышенной проницаемостью в средних магнитных полях Э47, Э48, толщиной листов 0,35 и 0,2 мм,

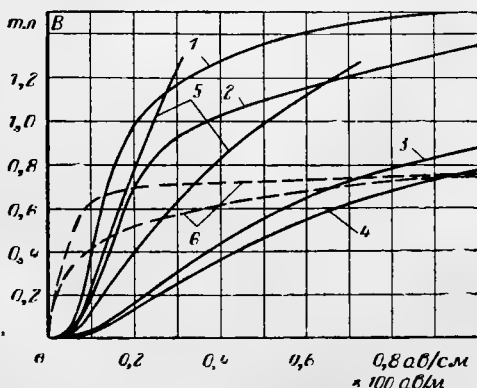


Рис. 27. Характеристики сталей с повышенной проницаемостью в средних магнитных полях (параметры по ГОСТ).

1 — сталь Э380; 2 — Э370; 3 — Э48; 4 — Э47; 5 — заводские характеристики на стали Э310, верхняя относится к лучшим сталям, нижняя — к худшим; 6 (пунктир) — мопермаллой при штампованных пластинах, верхняя — штамп по рис. 5,а, нижняя — по рис. 4,б.

особенно перспективны марки Э370, Э380 толщиной листов 0,5; 0,35 и 0,2 мм. Эти марки резко отличаются от остальных электросталей, приведенных в табл. 2. ГОСТ регламентирует параметры стали для марок Э47, Э48 от 0,1 до 10 ав/см, для марок Э370, Э380 от 0,03 до 10 ав/см, а для остальных марок: для лучших от 10 ав/см и выше, для худших от 25 ав/см и выше. На рис. 27 приведены характеристики (по ГОСТ, т. е. с минусовыми допусками) этих сталей, а также для сравнения заводские усредненные характеристики стали Э310. Пунктиром даны характеристики пермаллой: верхняя для Ш-образных пластин с уширенным основанием, нижняя для пластин по рис. 4,б.

В трансформаторах с очень малыми мощностями (например, так называемых «миниатюрных»), часто

применяемых в устройствах телеизмерений (в том числе в счетно-решающих устройствах), неизбежен переход на магнитомягкие материалы типа пермаллоя.

Расчет автотрансформатора. Автотрансформатором именуется трансформатор, имеющий одну обмотку с ответвлениями. Если сеть приключена к части

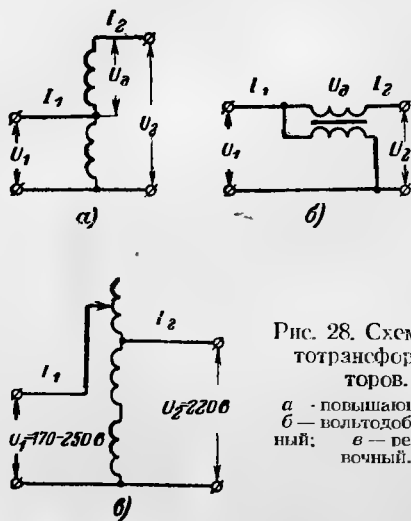


Рис. 28. Схемы автотрансформаторов.

a — повышающий;
б — понижающий;
в — регулировочный.

обмотки, а нагрузка ко всей обмотке, он будет повышающим (рис. 28, *a*). При этом автотрансформатор работает как вольтодобавочный. Его трансформируемая мощность определяется током нагрузки и добавочным напряжением (рис. 28, *б*):

$$P_T = U_D I_2.$$

На эту мощность и рассчитывают вольтодобавочный трансформатор (т. е. автотрансформатор), считая U_1 первичным, а U_D вторичным напряжением. К. п. д. всего автотрансформатора определится потерями в вольтодобавочном трансформаторе, отнесенными к полной мощности, и в основном будет определяться потерями в стали. Аналогично можно рассчитывать понижающие автотрансформаторы, считая их как вольтодобавочные, приняв за первичную сторону вторичную сторону. Но, конечно, в обоих случаях следует для компенсации падения напряжения в меди снижать число витков в се-

тесной обмотке и повышать во вторичной, кроме того, учитывать в первичной стороне ток намагничивания.

Широко применяются регулируемые автотрансформаторы для питания электронной и другой лабораторной аппаратуры (при колебаниях напряжения в сети).

На рис. 28,в дана схема подобного автотрансформатора. Обычно нижним пределом принимают 170 (или 180) в, а верхним 250 в. В таком случае максимальная трансформируемая мощность составит:

$$P_T = 170(I_2 - I_1) = I_1(220 - 170).$$

Часто такой автотрансформатор выполняют на удлиненном стержневом магнитопроводе, на верхнем слое которого прочищена дорожка, по которой скользит угольный контакт. При невысокой выбранной индукции его к. п. д. может быть выше 0,95. Расчет его производится, как указано выше, при $U_1 = 170$ в, $U_2 = 220 - 170$ в и токе I_2 . Вся регулирующая часть обмотки выполняется на ток I_2 . Окно магнитопровода должно быть увеличено для витков 220–250 в, которые при работе автотрансформатора в качестве повышающего являются балластом. Преимуществом автотрансформатора является уменьшение окна и веса магнитопровода, значительное уменьшение веса меди, повышенная теплопроводность обмотки за счет уменьшения объема меди и отсутствия межобмоточной прокладки и значительное повышение к. п. д. трансформации.

К нагрузочным трансформаторам относятся: часто изготавливаемые энергосистемами трансформаторы, служащие для испытаний той или иной аппаратуры (трансформаторов тока, контактов масляных выключателей и др.) большими токами, достигающими до 2—3 тыс. а, а также различные сварочные трансформаторы. Их расчет значительно отличается от расчета обычных трансформаторов.

От этих трансформаторов требуется отбирать максимально возможные мощности с той или иной продолжительностью, значительно меньшей установившегося режима. На рис. 29 приведена величина мощности, отбираемой от трансформатора, в зависимости от тока, определяемого сопротивлением нагрузки (для упрощения на рисунке не учитывается ток намагничивания). Имеются два значения, соответствующие нулевой отдаваемой мощности: когда ток равен нулю (э. д. с. намагничивания близка к напряжению сети U_1) и когда вторичная

обмотка замкнута (вторичный ток I_k максимальный), $U_2=0$, вся мощность теряется в трансформаторе, э. д. с. равна $0,5U_1$. Максимальная мощность отбора соответствует равенству $z_T = z_{нагр}$, при этом напряжение $U_2=0,5U_1$, э. д. с. равно $0,75U_1$. Мощность близка к максимальной в довольно широком пределе от 30 до 70% тока короткого замыкания, принятого за 100%. При 70%-ном токе потери в трансформаторе (без учета потерь в стали) более чем в 5 раз превышают потери при 30%-ном токе при той же отбираемой мощности. Более выгодным является соотношение $z_T \ll z_{нагр}$. Так как $z_{нагр}$ может быть различным, то для изменения z_T вторичную обмотку выполняют из двух или четырех секций, собираемых в различных комбинациях. Иногда делают восемь секций, но это усложняет схему переключений. Первичная обмотка выполняется двух-, иногда четырехсекционной.

Сопротивление соединительных вторичных проводов может быть соизмеримо (при больших токах) с сопротивлениями трансформатора и нагрузки. Кроме того, мощность сети на бесконечно велика, надо учитывать и сопротивление сети. Так как в конечном результате требуется не максимальный отбор мощности от трансформатора, а получение максимальной мощности на нагрузке, то приведенное выше выражение примет вид:

$$z_{сети} + z_T + z_{п. об} \ll z_{нагр.}$$

Нагрузочные трансформаторы по способу включения нагрузки делятся на две основные группы. В первой трансформатор включается с первичной нагрузкой на время включения нагрузки, во второй первичная обмотка трансформатора включена непрерывно, нагрузка подключается периодически,

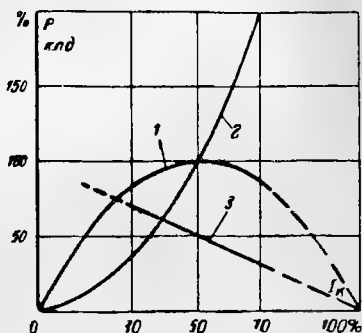


Рис. 29. Характеристики нагрузочного трансформатора при номинальном напряжении и при изменении $z_{нагр.}$

1 — снимаемая (вторичная) мощность; 2 — мощность, теряемая в трансформаторе; 3 — к. п. д. трансформатора. Максимальный отбор мощности (вторичной) принят за 100%; к. п. д. определяется в процентах.

К первой группе относится указанный выше нагрузочный трансформатор. Если при малых токах величину тока регулируют, то при подаче больших токов ток обычно не регулируют, а устанавливают примерную схему переключений и положение регулирующих устройств и фиксируют показание приборов. Время включения до 10—15 сек определяется временем успокоения стрелок прибора и опытностью работника. Перерыв между замерами обычно составляет 3—5 мин и более.

К той же группе относятся, например, аппарат для точечной сварки листовой стали. При замыкании контакта автомат подает напряжение, сводит электроды, сжимая детали, и производит сварку. Процесс продолжается около 1 сек. Перерыв — не менее 30 сек (перестановка детали).

В обоих случаях ток намагничивания при отсутствии нагрузки не имеет значения, так как при нагрузке значительно снижаются э. д. с. и ток намагничивания. За время интервала обмотка остывает. Допустимая плотность тока определяется продолжительностью интервала. При 1 сек работы и 30 сек перерыва значение допустимого тока составит 30-кратный от максимально допустимого длительного. При больших перерывах максимальная кратность обычно не превосходит 50—75-кратного, так как большие тепловые и динамические удары могут повредить изоляцию и обмотку.

Ко второй группе относится, например, сварочный трансформатор для дуговой сварки. Его первичная обмотка включена длительно. Ток намагничивания протекает непрерывно, и при отсутствии нагрузки он более высокий, что замедляет его охлаждение в перерывах. Величина тока намагничивания должна быть ограничена.

Обмотку для таких трансформаторов рекомендуется выполнять галетную проводом ПСД или ПСДК, лучше прямоугольного сечения. Стяжку и оплетку галет — лентой из стекловолокна. Галеты надо пропитывать кремнийорганическими лаками. Рабочая температура допустима 180° С, кратковременно (2—3 ч) до 250° С. Гильзы изготавливают из стеклотекстолита. Можно применять стеклотекстолитовые трубки соответствующего диаметра и магнитопровод выполнять ленточный стержневой с двумя катушками из полос стали разной ширины (рис. 30). Характеристики стали следует снять предва-

нительно на небольшом трансформаторе с ленточным магнитопроводом данной стали.

Дополнительные требования и повышение надежности. Часто, устанавливая в сыром помещении трансформатор (например, трансформатор «безопасности») или небольшой электродвигатель, применяют рубильник, смонтированный на шифере. При наличии влаги и пыли поверхностное сопротивление может снизиться в тысячи раз (рис. 13). За счет токов утечки по шиферу и в обмотке напряжение на выключенных ножах рубильника и, следовательно, на обмотке может быть больше 50% напряжения сети. По изоляции обмотки будут непрерывно циркулировать большие токи утечки, разрушая изоляцию и приводя к коррозии меди обмотки, особенно интенсивной при наличии газов. Но достаточно шиферную плиту разрезать поперек и укрепить на общих заземленных скобах узкую полуплиту с губками рубильника и вторую с ножами, и ток утечки с губок будет уходить в землю, не разрушая обмотку, экранированную заземленными скобами.

Утечки постоянного тока приводят к еще большим разрушениям изоляции и коррозии меди, вызывая в изоляции гальванический процесс. В электронных устройствах надежность и срок выходных трансформаторов и дросселей, включенных в плюсовой провод, значительно повышаются при изоляции магнитопровода от земли (шасси) и соединении с плюсом (если на них нет заземленных обмоток). При наличии потенциала между обмоткой и магнитной системой разрушающее действие токов утечки на изоляцию пропорционально квадрату напряжения.

В большинстве случаев при требованиях высокого уровня надежности целесообразно контакты, подающие напряжение на обмотки, крепить на металлическом заземленном основании, изолируя отдельно входной и выходной контакты. Следует избегать схем, в которых обесточенная обмотка остается под потенциалом по отношению к магнитопроводу.

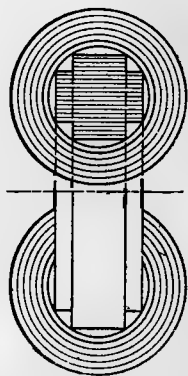


Рис. 30. Магнитопровод и обмотки нагрузочного трансформатора.

Сказанное выше относится к аппаратуре, находящейся в тяжелых внешних условиях. В помещениях с нормальной температурой и влажностью при применении современных изоляционных материалов токи утечки и их разрушающее действие могут быть снижены до допустимых величин (с учетом требуемого уровня надежности)¹.

В машинных помещениях с постоянной вибрацией здания все крепящие гайки, винты, болтовые соединения в изготавливаемой аппаратуре должны быть снабжены пружинными шайбами или контргайками. На небольших трансформаторах можно применять покраску резьбы, гаек, винтов каким-либо клеящим лаком. Необходимо учитывать возможность попадания в резонанс тех или иных элементов и участков монтажа. Вибрация катушек и гибких выводов может привести к их обрыву, в особенности если последние тронуты коррозией.

В устройствах, предназначенных для выездных испытаний, одним из существенных требований является обеспечение механической прочности (при минимальном весе устройства). При резьбовых соединениях применяются указанные выше меры. На футлярах и шасси следует применять оштамповку ребер жесткости. Крепление трансформатора (обычно наиболее тяжелой детали) может быть выполнено накладкой под шасси (рис. 9,е) с резьбой для шпилек. При узком шасси накладку можно проложить по ширине шасси, приварив на точечной сварке, что повысит жесткость шасси и упростит снятие трансформатора для ремонта.

Во всех устройствах следует предусмотреть возможность съема любой детали при минимальном снятии других элементов. Это повышает ремонтпригодность устройства.

Некоторые виды измерений. При мелкосерийном выпуске трансформаторов на первых трех-четырех трансформаторах проводятся подробные испытания с учетом технических условий на данный тип трансформатора. Определяются номинальные данные: мощность, коэффициент трансформации, к. п. д., напряжение короткого замыкания и характеристика намаг-

¹ При центральном отоплении и отсутствии устройств конденсирования воздуха при температуре 20°С влажность воздуха часто не превышает 20%, что соответствует абсолютной влажности менее 5 г на 1 м³.

ничивания (холостого хода). На остальных трансформаторах снимается минимум, определяемый техническими требованиями.

При испытаниях характеристика намагничивания строится в вольтах (по оси абсцисс) и в амперах тока намагничивания (вольт-амперные характеристики по действующим значениям тока при синусоидальном напряжении)¹.

Для трансформаторов, в которых предъявляются требования высокой точности, величина тока намагничивания является одним из основных параметров. В других случаях ограничивают его значение в пределах 20—30% номинального тока. Характеристику намагничивания следует снимать с превышением номинального напряжения на 20—30%.

Коэффициент трансформации k_t определяют по отношению напряжений на обмотках трансформатора (желательно при одновременном замере напряжений приборами класса 0,5). Этот коэффициент замеряется при холостом ходе трансформатора и при его номинальной нагрузке. В первом случае величина k_t определяется (примерно) отношением чисел витков. Во втором случае входит падение напряжения от нагрузки.

Необходимо проверить соответствие полученной мощности и расчетной. В основном это требуется для трансформаторов, работающих при повышенных плотностях тока. Мощность определяется допустимым перегревом изоляции сверх окружающей температуры.

В заводских условиях снятие температурных характеристик можно выполнять на опытных образцах с заложенными термopарами. В других условиях это не всегда возможно, но при катушках с несколькими обмотками можно определить температуры в разных обмотках (секциях) по измерению сопротивления провода до включения и после двух-трехчасового прогрева при полной нагрузке. Примерная характеристика по трем секциям (две первичные по 110 в и одна вторичная) дана на рис. 31. Если при этом замерить температуру поверхности обмот-

¹ На специальных устройствах, предназначенных для испытания стeпей, характеристики намагничивания снимаются по средним значениям напряжения и амплитудным значениям тока. Характеристики, приводимые ГОСТ, снимаются коммутационным способом, что соответствует амплитудным значениям тока. В зарубежной литературе ток часто приводится по средним значениям.

ки (термопарой или обычным термометром), будет получена с достаточным приближением тепловая характеристика обмотки (показана пунктиром). Могут быть замерены сопротивления в дополнительных секциях (от 110 до 127 в), не обтекаемые током, но участвующие в общем температурном режиме. Следует предусмотреть

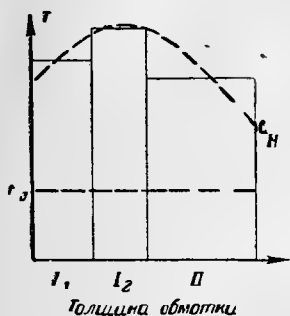


Рис. 31. Определение температурной характеристики обмотки.

I_1 , I_2 — две секции первичной обмотки; II — вторичная обмотка; t_0 — температура воздуха; t_n — температура наружного слоя обмотки.

быстрое переключение обмоток на замер (во избежание уравнивания их температур). При невыполнении замеров в один прием трансформатор следует включить на прогрев повторно на 2 ч. Температуру можно определить по табл. 18.

При превышении напряжения на 20% температура наиболее нагретой части обмотки не должна превышать допустимую для класса нагревостойкости применяемых материалов. Это требование может не выдерживаться при трансформаторах, предназначенных для работы в форсированных режимах.

Весьма существенным параметром является к. п. д. трансформатора η_t . Особенно это существенно для специальных трансформаторов, требующих высокого к. п. д. Последний определяется отношением вторичной активной мощности к первичной. Разницу между ними составляют потери в стали и меди.

В силовых трансформаторах средней и большой мощности обычно определяют общие потери по разности замеров двумя ваттметрами (первичной и вторичной мощности). Но так как погрешность должна быть отнесена не к полной мощности, а к разности $(1 - \eta_t)$, то при $\eta_t = 0,95$ (учитывая наличие двух ваттметров, технические приборы класса 1, замер по середине шкалы) погрешность, отнесенная к этой разности, может составить до 80%. Следовательно, необходим замер по классу 0,2. Помимо этого, на малых трансформаторах напряжения и токи могут иметь самые различные значения, что практически лишает возможности применения такого метода.

Потери в стали в малых трансформаторах могут быть с достаточной точностью определены одним ампер-

метром по следующему методу¹. На рис. 32 дана схема замера. Последовательно с амперметром включено омическое сопротивление на ток, равный 1,5—3 значения тока намагничивания (может быть применена лампа накаливания на соответствующую мощность). Параллельно сопротивлению включается рубильником первичная обмотка трансформатора. Обмотку шунтируют емкостью, которая подбирается при напряжении замера (при номинальном напряжении или при напряжении, соответствующем индукции 1 тл), до получения наименьшего значения общего тока. В качестве емкости может быть применен магазин емкостей или набор конденсаторов (при сети 220 в номинальное напряжение конденсаторов не ниже 400 в). Замеры следует производить во второй половине шкалы прибора.

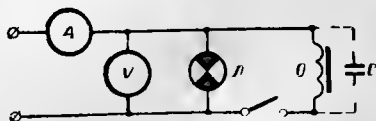


Рис. 32. Замер потерь в стали магнитопровода.

Л — нагрузка (лампа накаливания);
О — обмотка первичная; С — компенсирующая емкость.

Замерив полный ток, выключают рубильник и по разности показаний приборов определяют активную составляющую тока намагничивания. Замер с компенсацией емкостью без сопротивления невозможен ввиду искажающего влияния феррорезонанса токов. По той же схеме можно замерять потери в стали ваттметром любого класса, при этом компенсации емкостью не требуется. Поскольку замер производится по разности показаний одного прибора, погрешность не превышает класса точности данного прибора. Потери в меди за счет тока намагничивания могут быть учтены, но практически ими можно пренебречь.

Определение потерь в стали можно объединить со снятием характеристики намагничивания, что даст основные параметры для расчета.

Потери в меди составляют величину, равную двойному падению напряжения на первичной обмотке [см. (9)]. Сумма потерь в стали и меди определяет к. п. д. трансформатора.

В некоторых случаях определяют напряжение короткого замыкания трансформатора. Измерение произво-

¹ Разработан автором и применяется для замера потерь в стали, обеспечивая точность порядка 5—10%.

дится по схеме, приведенной на рис. 26. На первичную обмотку подается напряжение при замкнутой накоротко вторичной обмотке. С нуля поднимают напряжение до достижения током его номинального значения. Это напряжение является напряжением короткого замыкания. Его обычно дают в процентах по отношению к номинальному напряжению ($u_k, \%$).

Для мощных силовых трансформаторов сопротивление короткого замыкания имеет практически индуктивный характер. Для трансформаторов малой мощности (до 500—1 000 *вт*) оно близко к активному и определяет потери в меди, откуда $u_k, \% \approx 2u, \%$. При наличии нескольких вторичных обмоток для замера потерь в меди надо закорачивать все вторичные обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барзилович В. М., Высоковольтные трансформаторы тока, Госэнергоиздат, 1962.
 2. Барембо К. Н., Бернштейн Л. М., Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.
 3. Бобылев О. В., Кудрявцев В. В., Левин Б. И., Производство электроизоляционных материалов, изд-во «Высшая школа», 1966.
 4. Бурьянов Б. П., Трансформаторное масло, Госэнергоиздат, 1955.
 5. Кацалапенко В. И., Провода и кабели в СЦБ и связи, изд-во «Транспорт», 1966.
 6. Корицкий Ю. В., Электроизолирующие материалы, Госэнергоиздат, 1962.
 7. Кризе С. Н., Расчет маломощных силовых трансформаторов и дросселей фильтров, Госэнергоиздат, 1950.
 8. Куликов В. А., Обеспечение надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры, изд-во «Советское радио», 1966.
 9. Лысаченко И. А., Электрорадиоматериалы, изд-во «Связь», 1967.
 10. Маршак Е. Л., Ремонт обмоток электрических машин переменного тока, изд-во «Энергия», 1966.
 11. Соболевский А. Г., Материалы в радиоэлектронике, Госэнергоиздат, 1963.
 12. Сорин Я. М., Надежность радиоэлектронной аппаратуры, Госэнергоиздат, 1961.
 13. Сорин Я. М., Служба надежности, изд-во «Знание», 1966.
 14. Фелистак Ю. И., Простые самодельные радиодетали, Госэнергоиздат, 1959.
 15. Ямаиов С. А., Сачков Д. Д., Методы защиты радиодеталей от влаги, Госэнергоиздат, 1951.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные соотношения и расчетные условия в зависимости от назначения трансформатора	3
2. Магнитопроводы	11
3. Электротехнические материалы	29
4. Каркасы, обмотки	51
5. Расчет трансформатора	66
Литература	87

Цена 17 коп.

Еще больше электротехнической
литературы на
www.biblioet.narod.ru